

**Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**ВОРОНЦОВ БОРИС СЕРГІЙОВИЧ**

**УДК 621.9.04**

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС**

**Спеціальність 05.03.01 - процеси механічної обробки, верстати та  
інструменти**

**АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук**

**Київ – 2018**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі залізничного транспорту Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України, м. Сєверодонецьк та на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Пасічник Віталій Анатолійович,**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
завідувач кафедри інтегрованих технологій  
машинобудування

**Офіційні опоненти:** доктор технік наук, професор  
**Панчук Віталій Георгійович,**  
Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу, завідувач кафедри комп'ютеризованого  
машинобудівного виробництва

доктор технік наук, професор  
**Мироненко Євгеній Васильович,**  
Донбаська державна машинобудівна академія, декан  
факультету економіки та менеджменту

доктор технік наук, професор  
**Клочко Олександр Олександрович,**  
Національний технічний університет “Харківський  
політехнічний інститут”, професор кафедри технології  
машинобудування та металорізальних верстатів

Захист відбудеться 15 травня 2018 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.11 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус №1, ауд.214.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 13 квітня 2018 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д26.002.11



О.С. Ганпанцурова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Експлуатаційні можливості багатьох видів технічної продукції значною мірою залежать від точності деталей і вузлів, в тому числі зубчастих передач. Ступінь точності передач визначається нормами кінематичної точності, плавності роботи та контакту зубців, які в свою чергу залежать від точності профілю, що визначає функціональні поверхні зубчастих коліс. Сучасний стан теорії формоутворення зубчастих коліс, а особливо тих, у яких профіль зуба відрізняється від евольвентного, вже на рівні ідеального процесу формоутворення вносить істотну похибку в формоутворення профілю. Це викликано тим, що при створенні інструменту з економічних і технологічних міркувань теоретично точна інструментальна поверхня замінюється наближеною.

Застосування комп'ютерно-інтегрованих технологій дозволяє забезпечити високу точність формоутворення функціональних поверхонь зубців зубчастих коліс, прискорити процеси їх проектування, виготовлення і контролю. Для цього слід розробити таку систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс, яка мала б єдине математичне забезпечення, яке дозволить змінювати профіль зубців і форму спряжених з ними поверхонь в інтерактивному режимі, варіювати параметрами функції формоутворення для вибору інструментальної поверхні, що забезпечує точність профілю зубців зубчастих коліс, дозволить аналізувати умови контактування спряжених поверхонь, матиме єдиний інтерфейс з системами CAD/CAM/CAE, що, в свою чергу, дозволить повною мірою використовувати можливості сучасного обладнання з ЧПК та координатно-вимірювальних машин для виготовлення і контролю зубчастих коліс на основі отриманих електронних еталонів коліс та інструментів.

Тому скорочення термінів проектування та підвищення точності зубчастих коліс шляхом створення комп'ютерно-інтегрованої системи, яка забезпечує автоматизоване проектування вихідної інструментальної поверхні для формоутворення зубчастих коліс, незалежно від форми профілю зубців та виключення на рівні ідеального процесу формоутворення одного з головних чинників, що впливає на похибку профілю, є актуальною науково-практичною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота була виконана відповідно з Державними науково-технічними програмами по розділу 04. "Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології", а також згідно з науковими планами Міністерства освіти і науки України в Східноукраїнському національному університеті ім. В. Даля по держбюджетним темам «Теоретичні дослідження процесів плазмової, віброабразивної і гідроабразивної обробки, комп'ютерний синтез оптимальних технологічних середовищ» (номер держреєстрації 0104U000100), «Створення гіперболоїдних зубчастих передач другого роду з лінійним контактом зубців» (номер держреєстрації 0105U000893), «Створення високонавантажених зубчастих передач локомотивів з лінійним

контактом зубців» (номер держреєстрації 0111U000034), «Розробка інноваційного інструментарію створення високоефективного вантажного вагона, як основа формування конкурентних переваг транспортних коридорів України» (номер держреєстрації 0116U004160), «Створення багатофункціональних наукомістких методів енергетичного управління інженерією поверхонь контакту «колесо-рейка» для забезпечення еколого-ефективної передачі потужності» (номер держреєстрації 0117U000561) та в КПІ ім. Ігоря Сікорського по держбюджетній темі «Інноваційні технології та верстатно-інструментальне оснащення високопродуктивної обробки різанням сучасних конструкційних матеріалів» (номер держреєстрації 0117U000492).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності та плавності роботи зубчастих коліс, а також, скорочення термінів технологічного підготовки їх виробництва на базі нової комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз сучасного стану та перспектив розвитку теорії формоутворення зубчастих коліс в частині розвитку підходів до математичного опису функціональних поверхонь зубців та інструментальних поверхонь, що забезпечують їх формоутворення, та інтеграції з сучасними комп'ютерними технологіями проектування та виробництва.

2. Розробити комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс на основі уніфікації керуючих параметрів її елементів.

3. Розробити математичне забезпечення опису форми зубців зубчастих коліс, вихідних інструментальних поверхонь, геометричних і кінематичних показників процесу формоутворення на базі уніфікованих керуючих параметрів.

4. Реалізувати можливість інтерактивного керування формотвірними кривими лініями, що утворюють функціональні поверхні зубчастих коліс, забезпечити параметризацію елементів системи формоутворення зубчастих коліс, геометричних і кінематичних показників на базі єдиних уніфікованих керуючих параметрів, інтеграцію з автоматизованими системами проектування, виготовлення, аналізу та контролю.

5. Розробити нові підходи до узагальненого опису параметрів функції формоутворення, уніфікувати її математичне подання та проаналізувати можливості часткових випадків кінематичної схеми формоутворення 3-го класу для удосконалення інструменту.

6. Розробити математичне забезпечення для опису геометричних та кінематичних показників взаємодії спряжених поверхонь, як функцію від уніфікованих керуючих параметрів системи формоутворення, що дозволяє візуалізувати результати аналізу процесу формоутворення зубчастих коліс.

7. Розробити нові методичне, алгоритмічне і програмне

забезпечення, які в поєднанні реалізують комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс, впровадити їх у виробництво та у навчальний процес.

*Об'єкт дослідження* – автоматизований процес проектування систем формоутворення функціональних поверхонь зубчастих коліс.

*Предмет дослідження* – функціонально-параметричні зв'язки елементів формоутворюючих систем та автоматизація етапів їх проектування.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження здійснювалися на основі наукових положень теорії формоутворення, методів диференціальної геометрії та теорії поверхонь, теорії сплайнів, методів деформаційного конструювання геометричних об'єктів.

Для перевірки адекватності математичного забезпечення використані методи поверхневого і твердотілого комп'ютерного моделювання за допомогою сучасного програмного забезпечення провідних компаній-розробників з подальшим виготовленням і контролем деталей зі складними робочими поверхнями за еталонними комп'ютерними моделями.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі вперше на основі системного аналізу ідеальних процесів формоутворення запропоновано новий підхід до вирішення завдання забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності та плавності роботи зубчастих коліс, а також, скорочення термінів технологічного підготування їх виробництва, що базується на новій комп'ютерно-інтегрованій системі, в основу якої покладено уніфіковані керуючі параметри, що забезпечують формоутворення зубчастих коліс, які мають різну форму профілю зуба, з можливістю автоматизованого проектування, інтерактивного керування та візуалізації результатів досліджень. Для цього вперше:

1. Розроблено математичну модель для опису оброблювальної поверхні зубчастих коліс, в основу якої покладено математичні залежності, що дозволяють інтерактивно керувати формою зубців зубчастих коліс шляхом перетворення простору разом з залежною від нього поверхнею зубців та зміни внутрішніх параметрів, що визначають профіль зуба зубчатого колеса. Це створило умови для розробки комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення зубчастих коліс, побудованої на єдиних уніфікованих керуючих параметрах.

2. Розроблено математичну модель та визначено порядок використання її елементів для уніфікації опису вихідного контуру твірної поверхні, що забезпечується апроксимацією його точкового подання у виді сплайну, представленого кривими Безьє 3-го порядку, з уніфікованими керуючими параметрами, що дозволило створити систему формоутворення на єдиній параметричній базі не залежно від форми профілю зубчастих коліс.

3. Розроблено математичну модель системи формоутворення зубчастих коліс, в основу якої покладено новий підхід до узагальненого опису функції формоутворення, заснований на матричному представленні, суть якого полягає в тому, що перехід від системи координат оброблюваної

поверхні до системи координат інструментальної поверхні здійснюється за допомогою добутку єдиного набору елементарних матриць четвертого порядку, кожна з яких характеризує лише один елементарний поступальний або обертальний рух між сусідніми ланками та визначається одним параметром, який узгоджується з формотвірними чинниками цього руху, а перехід від одного класу кінематичної схеми формоутворення до іншого відбувається обнуленням параметра відповідної матриці, що дозволило в сукупності з математичною моделлю оброблювальної поверхні зубчастих коліс уніфікувати математичний опис та інтерактивно отримувати вихідну інструментальну поверхню.

4. Отримали подальший розвиток теоретичні положення щодо використання кінематичних схем формоутворення 3-го класу стосовно часткових випадків, зокрема кочення з ковзанням гіперболоїда по циліндру і кочення з ковзанням гіперболоїда по твірній прямій, для яких одержано математичні залежності функції формоутворення, що стало основою вдосконалення інструментів типу «однопорожнинний гіперболоїд».

5. Розроблено математичну модель для комплексного аналізу геометричних та кінематичних показників взаємодії спряжених поверхонь, яка базується на математичних залежностях, в основу яких покладені уніфіковані керуючі параметри, що дозволило ще на стадії проектування аналізувати як умови взаємодії оброблюваних та інструментальних поверхонь, що забезпечують їх виготовлення, так і умови контактування спряжених зубців зубчастих коліс.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі теоретичних та методологічних положень розроблено комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс, яка включає такі модулі, захищені свідоцтвами авторських прав на твір (№ 70762, № 70763, № 70764, № 70765, № 70766): «APACE»©, що реалізує перетворення заданого математичного опису геометрії поверхонь зубців зубчастих коліс до єдиного функціонального виду; «COPTeR»© і «COSET»©, що реалізують можливості інтерактивної зміни геометрії зубчастих коліс за допомогою перетворень простору і безпосередньо за допомогою керуючих уніфікованих елементів кривих, відповідно; «SCOT»©, що дозволяє синтезувати контактні точки робочого і верстатного зачеплень та експортувати їх в CAD-системи; «SAIAT»©, що дозволяє на підставі аналізу геометричних і кінематичних показників в точках контакту спряжених поверхонь в інтерактивному режимі синтезувати інструментальні поверхні і поверхні зубців зубчастих коліс.

З використанням комп'ютерно-інтегрованої системи спрофільовані та виготовлені гіперболоїдні інструменти для виготовлення зубчастих коліс з уніфікованим профілем зубців. На прикладі шевронних і гвинтових зубчастих коліс підтверджена можливість розробки еталонних комп'ютерних моделей з поліпшеним профілем зубців, відмінним від евольвентного та аналізу в системі Autodesk© PowerMill© процесу симуляції керуючих програм з подальшим виготовленням цих коліс на верстаті з ЧПК. Спроектвані та виготовлені із застосуванням адитивних технологій

шевронні зубчасті колеса з профілем зубців, отриманим за допомогою розробленого програмного забезпечення з відповідним аналізом.

Запропоновані і запатентовані (патенти України №25543А, №25541А, №29761А, №68546) зубчасті передачі та нові способи формоутворення зубчастих коліс і зубооброблювальних інструментів, що дозволяють підвищити ефективність виготовлення циліндричних і гіперболоїдних коліс з уніфікованим профілем і поліпшеними геометричними та кінематичними показниками.

Результати роботи впроваджено у виробництво, зокрема на ДП «ЛОРТА» концерну «Укроборонпром», ТОВ «НДІ «Редуктор» та у навчальний процес СНУ ім. Володимира Даля та КПІ ім. Ігоря Сікорського, що підтверджено відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові результати отримані здобувачем самостійно. Здобувач здійснив наукове обґрунтування розробок в області формоутворення зубчастих коліс, що забезпечує вирішення важливої науково-практичної проблеми - забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності та плавності роботи зубчастих передач, а також, скорочення термінів технологічного підготовки їх виробництва на базі нової комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс.

Постановка завдань і аналіз наукових результатів виконані разом з науковим консультантом і, частково, зі співавторами публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на міжнародних науково-технічних, науково-практичних конференціях і семінарах: VIII, IX Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми розвитку рейкового транспорту», 1998, 1999, Алушта-Луганськ; II Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні технології в освіті та промисловості», 2003, Миколаїв; V, VI, XI, XV Міжнародних науково-технічних конференціях «Машинобудування і техносфера XXI століття», 1998, 1999, 2004; 2008, Севастополь; Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-комунікаційні технології у середній і вищій школі», 2004, Ізмаїл; VI International Conference «The Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes (IQRUTSTP)», 2007, Hurghada (Egypt); VI, VII, VIII, IX, XI, XV Міжнародних науково-технічних конференціях «Важке машинобудування. Проблеми і перспективи розвитку», 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2017, Краматорськ; Міжнародній науково-технічній конференції «Машинобудування – очима молодих», 2013, Кременчук; III, VI Міжнародних науково-технічних конференціях «Прогресивні технології в машинобудуванні», 2014, 2017, Львів; IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna «Technika I Technologia Montażu Maszyny (TTVV-2017)», 2017, Rzeszów–Czarna (Polska).

Результати роботи доповідалися на міжнародному науковому семінарі по зубчастих передачах 13-14 грудня 2012 року в м. Гомель (Білорусь).

Дисертація в повному обсязі доповідалась на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» 6-10 лютого 2017 р, м. Львів та Міжнародній науково-технічній конференції ЗП-2017 «Проблеми якості та довговічності зубчастих передач і механічного приводу» 25-30 серпня 2017 р, м. Одеса.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 76 наукових робіт, в тому числі 48 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях іноземних держав, 8 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 4 патенти на корисну модель, 5 свідоцтв про авторські права на твір (програмне забезпечення), 19 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 397 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 268 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 5 таблицями та 149 рисунками. Список використаних джерел містить 291 найменування, з них 269 кирилицею та 22 латиницею.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрито суть і стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, наведено дані щодо наукової новизни, обґрунтовано достовірність і показано практичну цінність отриманих наукових результатів, наведено дані про публікації й апробацію роботи.

**У першому розділі** здійснено аналіз сучасного стану проблеми забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності і плавності роботи зубчастих передач, профіль зубців яких окреслено довільною (не лише евольвентною) кривою, а також скорочення термінів технологічної підготовки їх виробництва.

Базовим поняттям у вирішенні задач формоутворення є ідеальний процес – модель реального процесу. При розробленні такого процесу враховуються основні фактори, які впливають на показники якості та точності оброблюваної поверхні виробу. Початково приймається, що деталь, інструмент та обладнання не деформуються і не зношуються, теоретично точно виготовлені, працюють елементи технологічної системи ВПД, налагодження обладнання виконано досконально, а також не братимемо до уваги вплив теплових явищ на процес формоутворення.

Особливу увагу приділено питанню виявлення найбільш значущих причин виникнення похибок теоретичного формоутворення та отримання геометрично точних функціональних поверхонь зубчастих коліс і зуборізних інструментів, що вкрай важливо для створення електронних еталонів комп'ютерних моделей цих виробів – основи сучасних комп'ютерних систем проектування, аналізу, виробництва і контролю.

Доведено, що без вирішення теоретичних питань формалізації процесу



формоутворення інструменту на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, неможливо отримати позитивні результати забезпечення точності оброблення складнопрофільних поверхонь, до яких слід віднести зубчасті колеса.

На рис. 1 показано зв'язки елементів системи забезпечення точності формоутворення зубчастих коліс для ідеального процесу.



Рис. 1. Зв'язки елементів системи забезпечення точності формоутворення зубчастих коліс для ідеального процесу

Сформулюємо і обґрунтуємо три групи вимог до комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс: до математичного забезпечення (інваріантність, єдність параметрів, мінімальна достатність керуючих параметрів); до структури (модульність, забезпечення інтерфейсу з CAD/CAM/CAE-системами); до результатів (інтерактивна керованість, поточна візуалізація результатів досліджень). Проведений аналіз показав, що жодна з комерційних систем автоматизованого проектування не відповідає повною мірою вимогам до комп'ютерно-інтегрованих систем забезпечення формоутворення зубчастих коліс.

Аналіз літературних джерел за станом питання дозволив зробити висновок, що в даний час застосовується велика різноманітність математичного опису вихідних контурів твірних поверхонь для формоутворення зубчастих коліс. Незважаючи на те, що евольвентні зубчасті колеса займають значне місце серед в сучасних механізмах, для багатьох технічних завдань доцільніше використовувати зубчасті колеса з профілем зубців, відмінним від евольвентних. Це зубчасті колеса с зачепленням Новікова, синусоїдальні, циклоїдальні та інші зубчасті колеса. Кожен з цих типів зубчастих коліс потребує спеціалізованого математичного та програмного забезпечення для задач їх формоутворення та проектування вихідних інструментальних поверхонь. Тому, для створення комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення необхідно створити уніфіковане математичне забезпечення для довільного типу зубчастих коліс.

Проаналізовані найбільш вагомні чинники формування параметрів точності зубчастих коліс, серед яких слід відзначити кінематичну точність,

плавність роботи та площина контакту зубців. На рис. 2 розглянуті проблеми і перспективи забезпечення якості формоутворення зубчастих коліс.

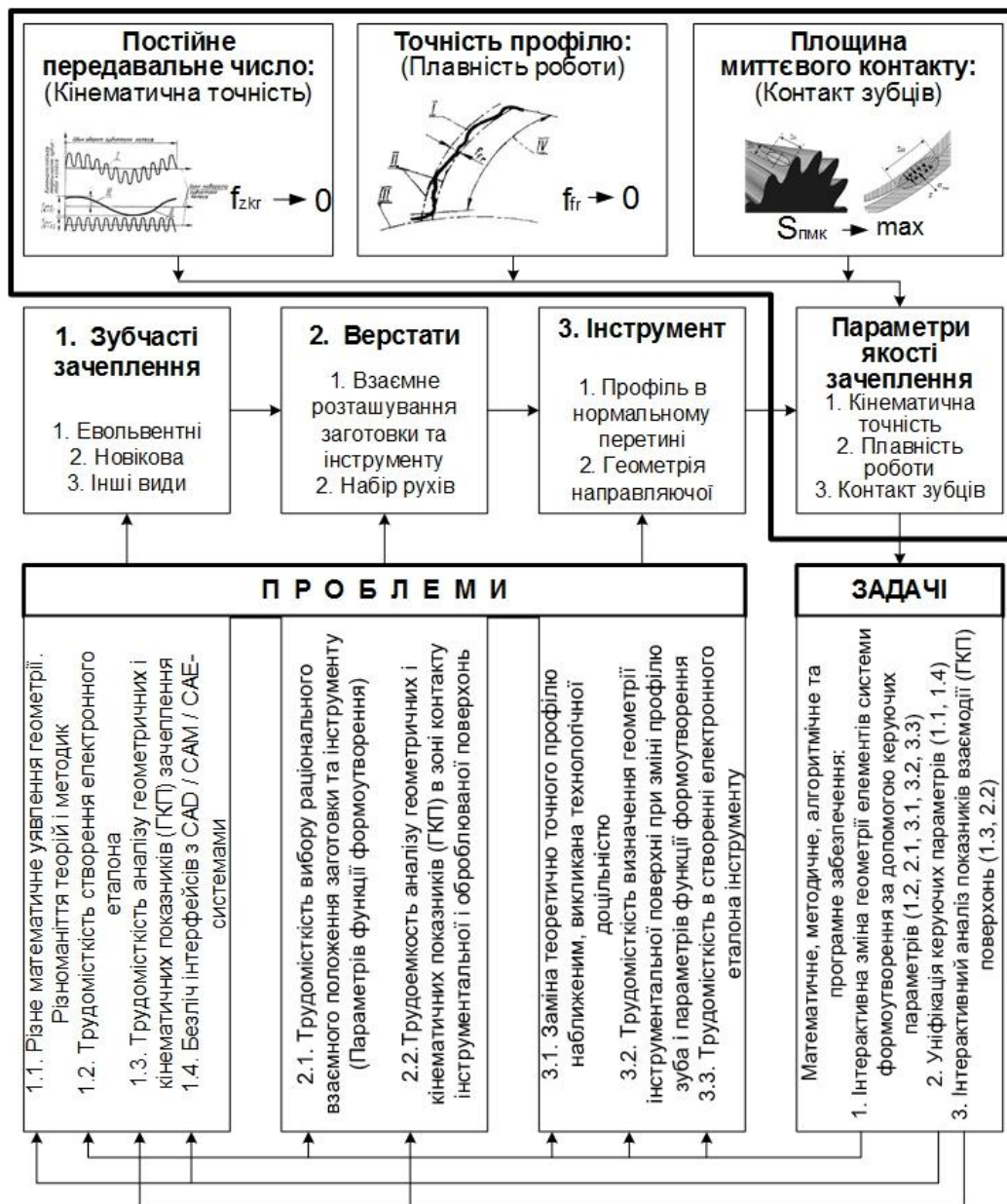


Рис. 2. Проблеми і перспективи забезпечення якості формоутворення зубчастих коліс

Значний внесок у вирішення проблем формоутворення поверхонь при механічному обробленні деталей внесено професорами А.І. Грабченком, І.Є. Грицаєм, В.О. Залогою, О.О. Клочко, С.І. Лашневим, В.С. Люкшиним, О.В. Мамлюком, Є.В. Мироненко, О.А. Охрименком, Б.А. Перепелицею, С.П. Радзевичем, Н.С. Равською, П.Р. Родіним, І.І. Семенченко, В.О. Шишковим, М.І. Юліковим, F.M.L. Amigouch, B.K. Choi, K. Marciniak, Chang Chao-Hwa and M.M. Melkanoff та ін.

Аналіз сучасного стану теорії формоутворення показав, що з появою комп'ютерних технологій теорія формоутворення істотно змінилася, розвиток теорії поверхонь і параметричного комп'ютерного моделювання дали можливість змінити підхід до розвитку теорії формоутворення

зубчастих коліс. З'явилися нові методики комп'ютерного поверхневого моделювання, що дозволяють видозмінювати форму поверхні в процесі конструювання, уніфікувати математичний опис об'єктів і розробляти універсальні системи формоутворення функціональних поверхонь.

Значний внесок у розвиток методів попереднього аналізу процесу формоутворення зубчастих коліс зробили Д.Т. Бабичев, В.О. Гавриленко, І.І. Дусев, М.Л. Єрихов, М.М. Крилов, Ф.Л. Літвін, А.І. Павлов, А.М. Підкоритов, В.М. Севрюк, Г.І. Шевелева та ін.

Сучасний стан інженерних систем аналізу геометричних та кінематичних показників взаємодіючих поверхонь дозволяє представити геометричні та кінематичні показники, як функцію від керуючих параметрів формотвірних поверхонь. Це дає змогу включати ці показники в систему формоутворення і в інтерактивному режимі оцінити ефективність процесу формоутворення.

Системний аналіз цих актуальних питань визначив мету роботи і задачі дослідження.

**У другому розділі** розроблена методологія формування математичної моделі інтерактивного керування кривими і поверхнями, які забезпечують можливість наскрізної параметризації елементів систем формоутворення, геометричних і кінематичних показників та системну інтеграцію з автоматизованими системами конструювання (CAD), виготовлення (CAM), аналізу (CAE) і контролю (CAI).

Інтерактивне керування формоутворенням функціональної поверхні в залежності від поставлених задач можна здійснювати двома способами: шляхом перетворення простору, в який поміщається вихідна крива, що описує профіль (рис.3) або функціональна поверхня чи шляхом зміни внутрішніх параметрів, що визначають геометрію функціональної поверхні зубчастих коліс (рис. 4).

Політканинне перетворення як один із способів деформації простору дозволяє керувати геометрією поверхні з будь-яким її математичною формалізацією і створювати комп'ютерно-інтегровані системи формоутворення, засновані на єдиному математичному описі з загальними керуючими параметрами.

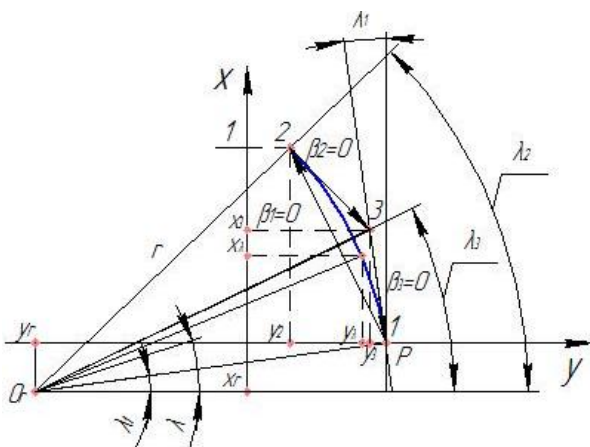


Рис. 3. Дуга кола в політканинній системі координат

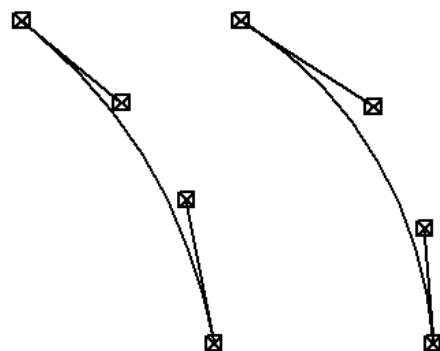


Рис. 4. Керування кривої за допомогою керуючих точок

Координати вихідного контуру рівні:

$$\begin{aligned} x_k = f_1(\lambda) &= \frac{D_y(\lambda)G(\lambda) - D(\lambda)G_y(\lambda)}{D_x(\lambda)G_y(\lambda) - D_y(\lambda)G_x(\lambda)} \\ y_k = f_2(\lambda) &= \frac{D(\lambda)G_x(\lambda) - D_x(\lambda)G(\lambda)}{D_x(\lambda)G_y(\lambda) - D_y(\lambda)G_x(\lambda)}. \end{aligned}$$

Функції правої частини рівнянь включають в себе коефіцієнти  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ , які однозначно залежать від координат керуючих точок політканинної системи координат (рис. 3):

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{y_j - y_i}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}; \\ B_i &= \frac{x_j - x_i}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}; \\ C_i &= -(B_i y_i + A_i x_i). \end{aligned}$$

Особливе місце в задачах керування формою ліній займають криві Безьє 3-го порядку. Крім того, вони використовуються у більшості існуючих систем твердотільного і поверхневого комп'ютерного моделювання.

Рівняння кривої Безьє 3-го порядку:

$$\bar{r}_k = (1 - \lambda)^3 p_0 + 3(1 - \lambda)^2 \lambda p_1 + 3(1 - \lambda) \lambda^2 p_2 + \lambda^3 p_3,$$

або в параметричному вигляді:

$$\begin{aligned} x_k = f_1(\lambda, P_x) &= (1 - \lambda)^3 x_0 + 3(1 - \lambda)^2 \lambda x_1 + 3(1 - \lambda) \lambda^2 x_2 + \lambda^3 x_3, \\ y_k = f_2(\lambda, P_y) &= (1 - \lambda)^3 y_0 + 3(1 - \lambda)^2 \lambda y_1 + 3(1 - \lambda) \lambda^2 y_2 + \lambda^3 y_3. \end{aligned}$$

де  $P_x = (x_0, x_1, x_2, x_3)$ ,  $P_y = (y_0, y_1, y_2, y_3)$  – радіус-вектори координат опорних  $P_0$ ,  $P_3$  і керуючих  $P_1$ ,  $P_2$  точок;  $\lambda = 0 \dots 1$  – поточний параметр, що визначає точку на кривій.

Для уніфікації керуючих параметрів, які модифікують геометрію довільних поверхонь розроблено математичне та методичне забезпечення, що дозволяє звести математичний опис будь-якій кривій або поверхні до єдиного вигляду.

Криву Безьє 3-го порядку можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} x_i &= (1 - \lambda_i)^3 x_0 + 3(1 - \lambda_i)^2 \lambda_i x_1 + 3(1 - \lambda_i) \lambda_i^2 x_2 + \lambda_i^3 x_3, \\ y_i &= (1 - \lambda_i)^3 y_0 + 3(1 - \lambda_i)^2 \lambda_i y_1 + 3(1 - \lambda_i) \lambda_i^2 y_2 + \lambda_i^3 y_3. \end{aligned}$$

У задачі мінімізації відхилення точок кривої Безьє від заданих точок керованими параметрами є координати точок, якими керують. Перебираючи значення  $x_1$  і  $x_2$  з першого рівняння системи, визначаємо значення  $\lambda_i = f(x_i, x_1, x_2)$ .

Цільову функцію визначимо, користуючись методом найменших квадратів:

$$S = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \min ,$$

де  $\delta_i = y_i - y_{iB} = y_i - \left[ (1 - \lambda_i)^3 y_0 + 3(1 - \lambda_i)^2 \lambda_i y_1 + 3(1 - \lambda_i) \lambda_i^2 y_2 + \lambda_i^3 y_3 \right]$  відхилення поточних значень координат  $y_{iB}$  кривої Безьє, отриманих з другого рівняння системи від заданих табличних значень  $y_i$ .

На підставі цього методу була розроблено програмне забезпечення «APACE».

Рівняння інтерактивно керованої поверхні в системі координат  $S_I$ :

$$\bar{r}_1(\lambda, \mu) = f_1(P, N),$$

де  $P = P(p_0, p_1, p_2, p_3)$ ,  $N = N(n_0, n_1, n_2, n_3)$  – вектори керуючих і опорних точок (рис. 5).

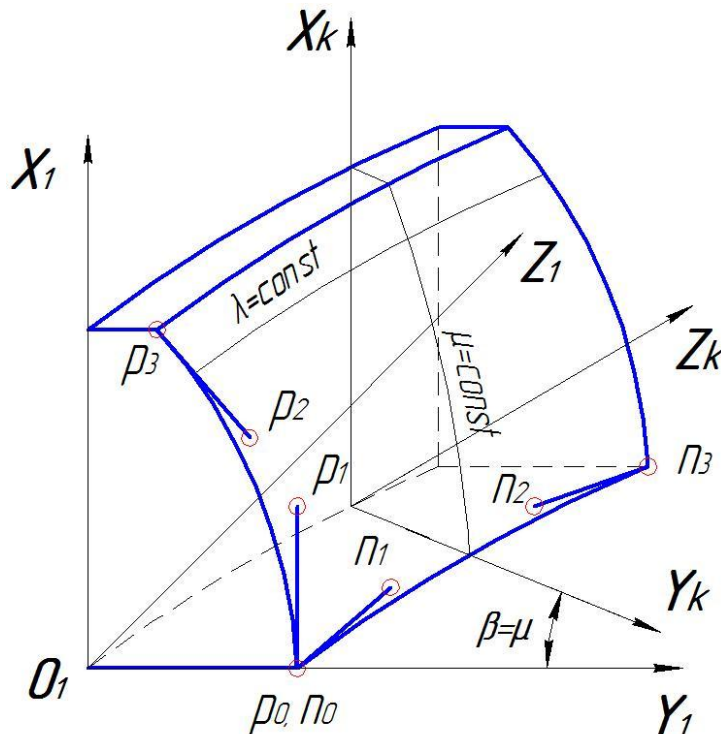


Рис. 5. Функціональна поверхня

Рівняння функціональної поверхні в системі координат  $S_n$ :

$$\bar{r}_n(\lambda, \mu, P, N) = \bar{r}_0(\mu, N) + \bar{b}_n(\mu, N) f_1(\lambda, P_x) + \bar{n}_n(\mu, N) f_2(\lambda, P_y),$$

або в параметричній формі

$$\begin{aligned}x_n(\lambda, \mu, P, N) &= x_n(\mu, N) + b_{xn}(\mu, N) f_1(\lambda, P_x) + n_{xn}(\mu, N) f_2(\lambda, P_y); \\y_n(\lambda, \mu, P, N) &= y_n(\mu, N) + b_{yn}(\mu, N) f_1(\lambda, P_x) + n_{yn}(\mu, N) f_2(\lambda, P_y); \\z_n(\lambda, \mu, P, N) &= z_n(\mu, N) + b_{zn}(\mu, N) f_1(\lambda, P_x) + n_{zn}(\mu, N) f_2(\lambda, P_y),\end{aligned}$$

де  $b_{xn}(\mu, N)$ ,  $b_{yn}(\mu, N)$ ,  $b_{zn}(\mu, N)$  – напрямні косинуси бінормалі;  
 $n_{xn}(\mu, N)$ ,  $n_{yn}(\mu, N)$ ,  $n_{zn}(\mu, N)$  – напрямні косинуси головної нормалі.

Для отримання геометричних і кінематичних показників контактуючих поверхонь в процесі формоутворення і експлуатації необхідні такі елементи функціональної поверхні, як нормаль та її проекції на осі координат, коефіцієнти першої та другої квадратичних форм, нормальні кривизни в заданих напрямках.

Одиничний вектор нормалі в параметричній формі:

$$\begin{aligned}e_{xn} &= -\frac{f_2'(\lambda, P_y)}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}; \\e_{yn} &= \frac{f_1'(\lambda, P_x) \cos \beta}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}}; \\e_{zn} &= -\frac{f_1'(\lambda, P_x) \sin \beta}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}},\end{aligned}$$

Коефіцієнти першої квадратичної форми для поверхні (рис. 5):

$$\begin{aligned}E_n &= [f_1'(\lambda, P_x)]^2 + [f_2'(\lambda, P_y)]^2; \\F_n &= 0; \\G_n &= |\vec{r}_0'|^2 \cdot (1 - K f_2(\lambda, P_y))^2 = (\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2) \cdot (1 - K f_2(\lambda, P_y))^2.\end{aligned}$$

Коефіцієнти другої квадратичної форми:

$$\begin{aligned}L_n &= -f_1''(\lambda, P_x) \sin \alpha + f_2''(\lambda, P_y) \cos \alpha; \\M_n &= 0; \\N_n &= K \cos \alpha \cdot (\dot{y}_n^2 + \dot{z}_n^2) \cdot [1 - K f_2(\lambda, P_y)].\end{aligned}$$

Напрямок, в якому визначається кривизна, залежить від значень  $d\lambda$  і  $d\mu$ . Так, наприклад, кривизна вздовж ліній  $\lambda = const$  дорівнює:

$$K_\mu = \frac{N_n}{G_n} = \frac{K \cos \alpha}{1 - K f_2(\lambda, P_y)},$$

а кривизна вздовж ліній  $\mu = const$ , тобто кривизна профілю, складає



$$K_{\lambda} = \frac{L_n}{E_n} = \frac{f_1'(\lambda, P_x)f_2''(\lambda, P_y) - f_1''(\lambda, P_x)f_2'(\lambda, P_y)}{\left[ \left( f_1'(\lambda, P_x) \right)^2 + \left( f_2'(\lambda, P_y) \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}.$$

Модифікований на основі наведеної методики формалізований опис профілів зубчастих коліс, зведений до універсального виду на базі уніфікованих керуючих параметрів дозволяє здійснити ефективну апроксимацію складнопрофільних профілів сплайнами і забезпечує використання єдиного методичного, алгоритмічного і програмного забезпечення, що сприяє підвищенню точності виготовлення функціональних поверхонь зубчастих коліс, а також скорочує термін конструкторсько-технологічного підготовки виробництва.

**У третьому розділі** розроблені нові підходи до узагальненого опису функції формоутворення, уніфіковано її геометричну формалізацію та проаналізовані можливості її застосування.

На основі класифікації кінематичних схем формоутворення, запропонованої професором П.Р. Родіним розроблено математичний опис функції формоутворення з використанням керуючих параметрів, що дозволяють оперативно переходити в інтерактивному режимі від одного типу і класу кінематичних схем до іншого.

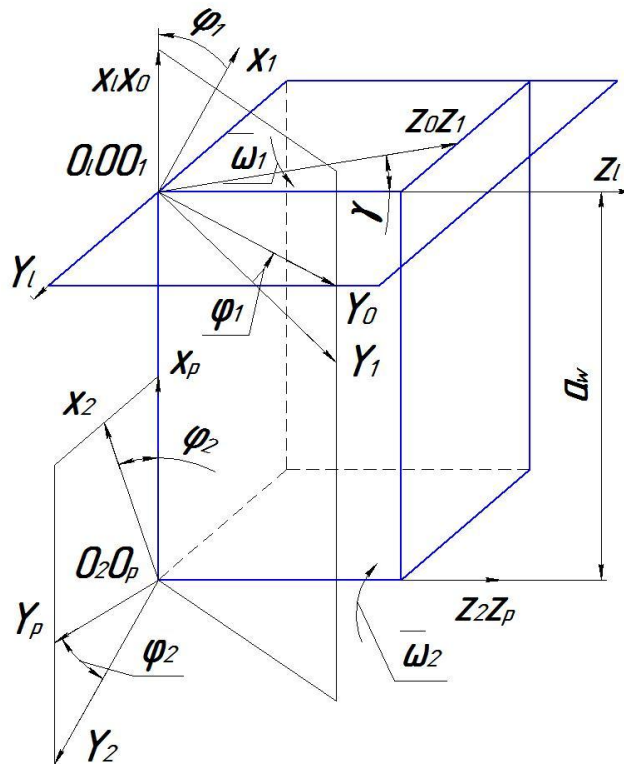


Рис. 6. Системи координат для кінематичних схем формоутворення 3-го класу

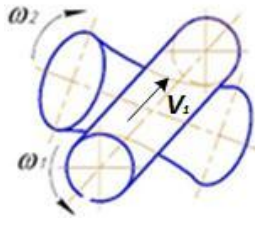
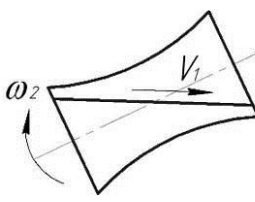
Узагальнене матричне подання функції формоутворення має вигляд:

$\bar{r}_2(\lambda, \mu, P, N) = M_{62p}(\varphi_2) \cdot M_{1pl}(a_w) \cdot M_{4lm}(\gamma) \cdot M_{3m0}(0) \cdot M_{601}(\varphi_1) \cdot \bar{r}_1(\lambda, \mu, P, N)$   
де  $M$  позначає матрицю, а цифри після неї характеризують елементарні руху: 1, 2, 3 – елементарні переміщення, відповідно уздовж осей  $X, Y, Z$ , а 4, 5, 6 – елементарні обертання, відповідно навколо осей  $X, Y, Z$ . Індеси показують, які системи координат пов'язує відповідна матриця  $M$ . У дужках вказані керуючі параметри, що впливають на структуру взаємодії спряжених поверхонь.

Розвиток теорії формоутворення дозволяє розширити можливості взаємодії спряжених поверхонь і розглядати нові типи схем формоутворення, на основі яких можна створювати інструменти з покращеними властивостями (табл. 1).

Таблиця 1

## Нові типи кінематичних схем формоутворення 3-го класу

| Клас схеми | Тип схеми | Відносний рух виробу та інструменту при профілюванні                         |                 | Подання відносного руху за допомогою аксоїдів | Ескіз взаємного розташування аксоїдів  | Аксоїд                 |                        |
|------------|-----------|--|-----------------|---|--|------------------------|------------------------|
|            |           | Складові   | Сумарне миттєве |   |  | Інструмента            | Виробу                 |
| 3          | 4         | Два обертання навколо перехресних осей, поступальний рух уздовж осі циліндра | Гвинтове        | Кочення з ковзанням гіперboloїда по циліндру  |   | Гіперboloїд<br>Циліндр | Циліндр<br>Гіперboloїд |
| 3          | 5         | Обертання гіперboloїда навколо своєї осі, поступальний рух уздовж прямої     | Гвинтове        | Кочення з ковзанням гіперboloїда по прямій    |  | Гіперboloїд<br>Пряма   | Пряма<br>Гіперboloїд   |

Рівняння вихідної інструментальної поверхні, що огинають поверхню циліндричного колеса можуть бути знайдені шляхом підстановки координат керуючих точок кривої Безьє 3-го порядку, яка описує профіль циліндричного колеса. З урахуванням математичного опису функції формоутворення, рівняння функціональної поверхні матиме вигляд:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= (f_1(\lambda, P_x) - r_1)(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \gamma \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + f_2(\lambda, P_y) \times \\ &\times (\cos \gamma \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cos \varphi_2) - \mu \sin \gamma \sin \varphi_2 + a_w \cos \varphi_2 \\ y_2 &= (f_1(\lambda, P_x) - r_1)(\cos \gamma \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2 \cos \varphi_1) + f_2(\lambda, P_y) \times \\ &\times (\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \gamma \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) - \mu \sin \gamma \cos \varphi_2 - a_w \sin \varphi_2 \\ z_2 &= (f_1(\lambda, P_x) - r_1) \sin \gamma \sin \varphi_1 + f_2(\lambda, P_y) \sin \gamma \cos \varphi_1 + \mu \cos \gamma \end{aligned} \right\}$$



Рівняння верстатного зачеплення:

$$\begin{aligned}
 F(\lambda, z_1, P, N, \varphi_1) = & P^2 z_1 [f_1'(\lambda, P_x) \sin(z_1 + \varphi_1) + f_2'(\lambda, P_y) \cos(z_1 + \varphi_1)] + \\
 & + Pa_w [f_2'(\lambda, P_y) \sin(z_1 + \varphi_1) - f_1'(\lambda, P_x) \cos(z_1 + \varphi_1)] \operatorname{ctg} \gamma - \\
 & - [(f_1(\lambda, P_x) - r_1) \cos(z_1 + \varphi_1) - f_2(\lambda, P_y) \sin(z_1 + \varphi_1) + \\
 & + a_w P (1 - u_{21} \cos \gamma / u_{21} \sin \gamma) \cdot [f_1'(\lambda, P_x) (f_1(\lambda, P_x) - r_1) + f_2(\lambda, P_y) f_2'(\lambda, P_y)]]
 \end{aligned}$$

За допомогою розробленого програмного забезпечення «SCOT» визначені точки контакту поверхонь зубців просторового зачеплення.

| Результаты расчета |             |             |             |             |             |              |             |             |  |  |  |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--|--|--|
| Xk = -48.999       | Yk = 0.326  | Zk = -2.978 | Xg = 21.501 | Yg = 2.441  | Zg = 1.736  | Xo = -48.999 | Yo = 0.326  | Zo = -2.978 |  |  |  |
| Xk = -49.186       | Yk = 0.271  | Zk = -2.316 | Xg = 21.314 | Yg = 1.89   | Zg = 1.365  | Xo = -49.186 | Yo = 0.271  | Zo = -2.316 |  |  |  |
| Xk = -49.375       | Yk = 0.213  | Zk = -1.7   | Xg = 21.125 | Yg = 1.381  | Zg = 1.014  | Xo = -49.375 | Yo = 0.213  | Zo = -1.7   |  |  |  |
| Xk = -49.568       | Yk = 0.15   | Zk = -1.125 | Xg = 20.932 | Yg = 0.909  | Zg = 0.68   | Xo = -49.568 | Yo = 0.15   | Zo = -1.125 |  |  |  |
| Xk = -49.763       | Yk = 0.084  | Zk = -0.585 | Xg = 20.737 | Yg = 0.469  | Zg = 0.359  | Xo = -49.763 | Yo = 0.084  | Zo = -0.585 |  |  |  |
| Xk = -49.962       | Yk = 0.014  | Zk = -0.074 | Xg = 20.538 | Yg = 0.058  | Zg = 0.049  | Xo = -49.962 | Yo = 0.014  | Zo = -0.074 |  |  |  |
| Xk = -50.163       | Yk = -0.06  | Zk = 0.41   | Xg = 20.337 | Yg = -0.329 | Zg = -0.252 | Xo = -50.163 | Yo = -0.06  | Zo = 0.41   |  |  |  |
| Xk = -50.367       | Yk = -0.138 | Zk = 0.871  | Xg = 20.133 | Yg = -0.693 | Zg = -0.545 | Xo = -50.367 | Yo = -0.138 | Zo = 0.871  |  |  |  |
| Xk = -50.575       | Yk = -0.22  | Zk = 1.312  | Xg = 19.925 | Yg = -1.038 | Zg = -0.832 | Xo = -50.575 | Yo = -0.22  | Zo = 1.312  |  |  |  |
| Xk = -50.785       | Yk = -0.307 | Zk = 1.736  | Xg = 19.715 | Yg = -1.366 | Zg = -1.114 | Xo = -50.785 | Yo = -0.307 | Zo = 1.736  |  |  |  |
| Xk = -50.999       | Yk = -0.398 | Zk = 2.144  | Xg = 19.501 | Yg = -1.678 | Zg = -1.393 | Xo = -50.999 | Yo = -0.398 | Zo = 2.144  |  |  |  |

Рис. 7. Приклад розрахунку координат контактних точок

Отримані результати у вигляді текстового файлу передаються в CAD-систему, в результаті чого на екрані відображається група контактних точок, що описують контактну лінію в заданій системі координат (рис. 8).

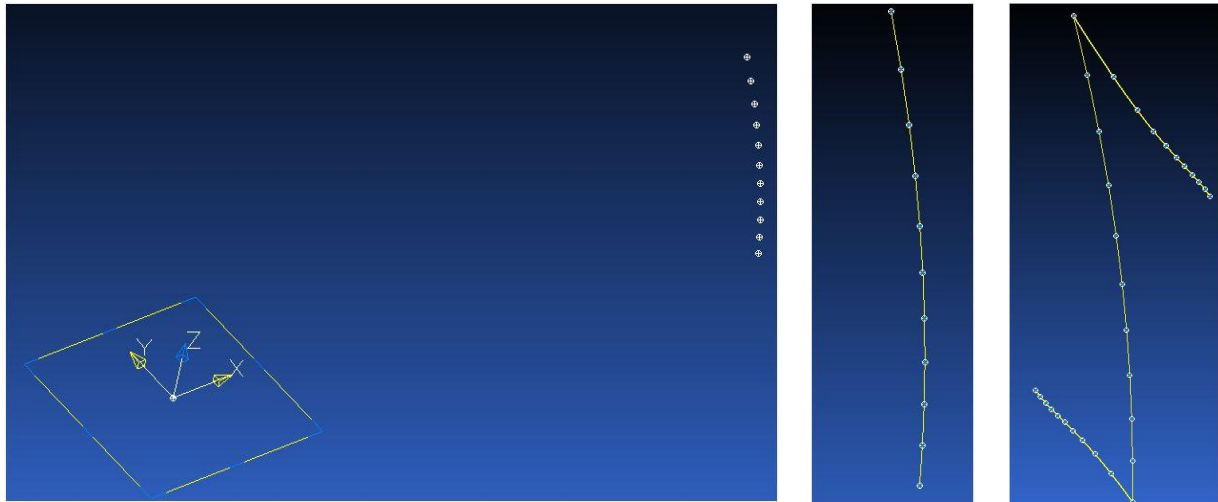


Рис. 8. Відображення контактних точок і контактних ліній

Рівняння контактних ліній:

$$\left. \begin{aligned}
 x &= x(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1), \quad y = y(\lambda, \mu, P, N, \varphi_1), \quad z = z(\lambda, \mu, P, N), \\
 n_x[-y(1 - u_{21} \cos \gamma) - zu_{21} \sin \gamma] + n_y[x(1 - u_{21} \cos \gamma) - a_w u_{21} \cos \gamma] + \\
 &+ n_z[(x + a_w)u_{21} \sin \gamma] = 0.
 \end{aligned} \right\}$$

Довжина контактної лінії має вигляд:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 + \left(\frac{d\mu}{dt}\right)^2} d\lambda ,$$

На рис. 9 показано побудову функціональної поверхні зуба гіперболоїдного інструменту, а на рис. 10 наведено аналіз ліній контакту і умов обкатки. По довжині, формі і розташуванню контактних ліній на поверхні зубців інструменту і колеса можна судити про експлуатаційні властивості спроектованого інструменту.

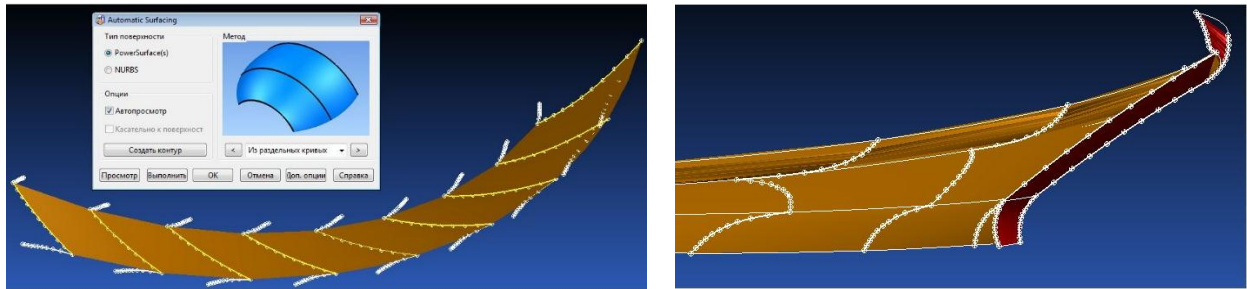


Рис. 9. Побудова поверхні зуба

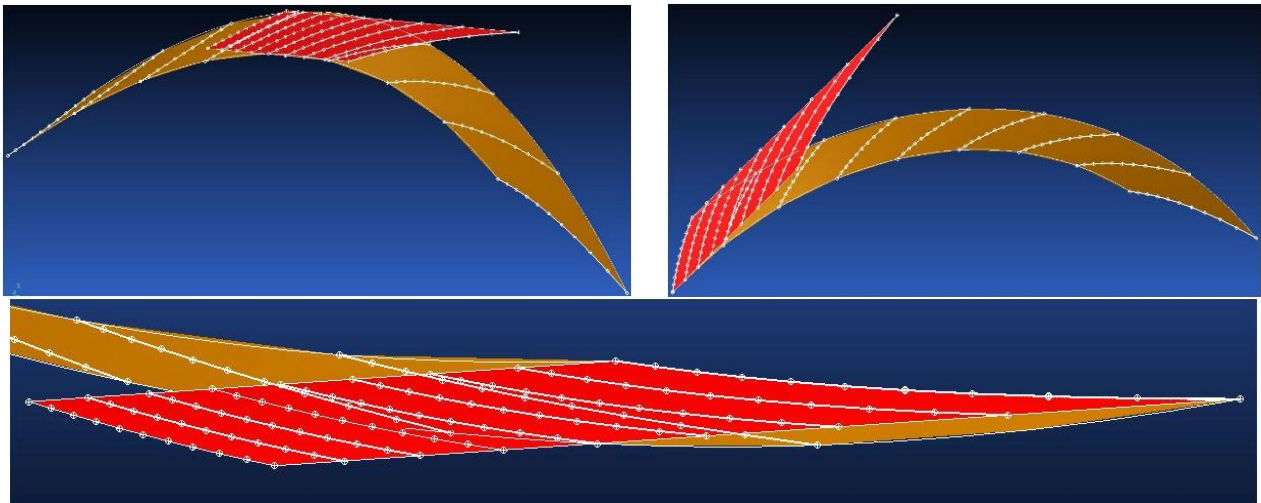


Рис. 10. Дослідження ліній контакту і умов обкатки

Математичний опис другого типу кінематичної схеми формоутворення 2-го класу має вигляд:

$$\bar{r}_2(\lambda, \mu, P, N) = M_{62p}(\varphi_2) \cdot M_{1pl}(R_1 + R_2) \cdot M_{4lm}(0) \cdot M_{3mk}(0) \cdot M_{6k1}(\varphi_1) \cdot \bar{r}_1(\lambda, \mu, P, N)$$

Воно відповідає матричному поданню кінематичної схеми формоутворення 3-го класу за умови, коли кут схрещування між осями дорівнює  $0^0$ , тобто осі обертання аксоїдів паралельні.

Запропонований новий підхід до узагальненого опису функції формоутворення зубчастих коліс, заснований на її матричному представленні

і уніфікованих керуючих параметрах кривої, яка описує профіль зуба, дозволив уніфікувати математичний опис і реалізувати інтерактивне керування структурою системи формоутворення і автоматизувати процес проектування вихідної інструментальної поверхні.

**У четвертому розділі** розроблено математичне забезпечення для опису геометричних та кінематичних показників контактування спряжених поверхонь, як функції від уніфікованих керуючих параметрів системи формоутворення, що дозволяє реалізувати інтерактивний аналіз процесу формоутворення зубчастих коліс.

Для попередньої оцінки умов взаємодії інструментальних і оброблюваних поверхонь в процесі формоутворення зубчастих коліс і контактування функціональних поверхонь зубців зубчастих передач отримані наступні геометричні та кінематичні показники:

- відносної швидкості ковзання:

$$\begin{aligned}
 V_x^{(12)} &= -(f_1(\lambda, P_x) \sin \varphi_1 + f_2(\lambda, P_y) \cos \varphi_1)(1 - u_{21} \cos \gamma) + \\
 &\quad [a_w u_{21} \cos \gamma (f_2'(\lambda, P_y) - f_1'(\lambda, P_x) \cos \varphi_1) - (1 - u_{21} \cos \gamma)(f_2(\lambda, P_y) f_2'(\lambda, P_y) + \\
 &\quad + f_1'(\lambda, P_x) f_1(\lambda, P_x))] / (f_2'(\lambda, P_y) \cos \varphi_1 + f_1'(\lambda, P_x) \sin \varphi_1); \\
 V_y^{(12)} &= (f_1(\lambda, P_x) \cos \varphi_1 - f_2(\lambda, P_y) \sin \varphi_1)(1 - u_{21} \cos \gamma) - a_w u_{21} \cos \gamma; \\
 V_z^{(12)} &= (f_1(\lambda, P_x) \cos \varphi_1 - f_2(\lambda, P_y) \sin \varphi_1 + a_w) u_{21} \sin \gamma.
 \end{aligned}$$

- кут між вектором відносної швидкості ковзання і напрямком контактних ліній

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} \nu_\tau &= -[F^\mu ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) (\vec{r}_1^\mu \vec{V}^{(12)}) - \\
 &\quad - F^\lambda (\vec{r}_1^\lambda \vec{V}^{(12)})] / [(\vec{r}_1^\mu \vec{V}^{(12)}) F^\lambda - \\
 &\quad - (\vec{r}_1^\lambda \vec{V}^{(12)}) F^\mu] \sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}
 \end{aligned}$$

- сумарна швидкість переміщення точок контакту

$$\begin{aligned}
 u_{\vec{\tau}} &= \frac{2F^{\varphi 1} E_1 + F^\mu (\vec{r}_1^\lambda \vec{V}^{(12)}) - F^\mu E_1 (\vec{r}_1^\mu \vec{V}^{(12)})}{\sqrt{E_1 [(F^\mu)^2 + (F^\lambda)^2]}} = \\
 &= \frac{2F^{\varphi 1} ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) - F^\lambda (\vec{r}_1^\lambda \vec{V}^{(12)}) - ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) F^\mu (\vec{r}_1^\mu \vec{V}^{(12)})}{\sqrt{((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) [(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2] (F^\mu)^2 + (F^\lambda)^2}}
 \end{aligned}$$

– коефіцієнти питомих ковзань

$$\eta_1 = \frac{-[\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\mu ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) F^\mu + (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda) F^\lambda]}{F^{\phi 1} ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)}$$

$$\eta_2 = \frac{1 - F^{\phi 1} ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2)}{[F^{\phi 1} ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\mu ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) F^\mu - (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda) F^\lambda]}$$

– приведена кривизна в напрямку, перпендикулярному лінії контакту

$$\chi_{np} = \frac{1}{\sqrt{(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2}} \times$$

$$\times \frac{-[(f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2 (F^\mu)^2 + (F^\lambda)^2]}{((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) F^{\phi 1} - F^\lambda (\vec{V}^{(12)\rightarrow} r_1^\lambda) - F^\mu ((f_1'(\lambda, P_x))^2 + (f_2'(\lambda, P_y))^2) (\vec{r}_1^\mu \vec{V}^{(12)})}$$

Інтерактивний аналіз приведеної кривизни інструментальної поверхні гіперболоїдного інструменту і функціональної поверхні зуба зубчастого колеса, яке виготовляється, в напрямку, перпендикулярному лінії контакту представлений на рис. 11.

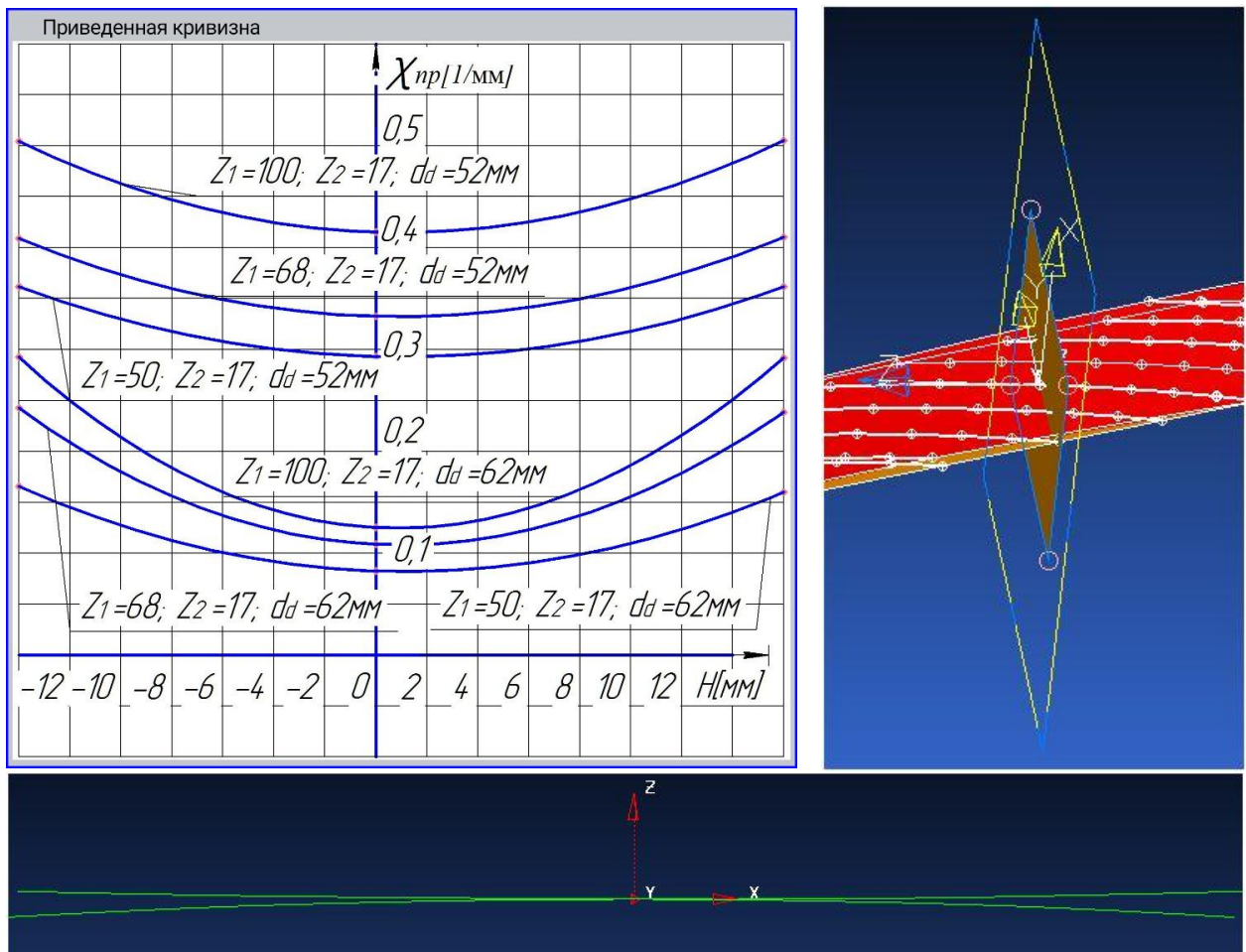


Рис. 11. Інтерактивний аналіз приведеної кривизни

В роботі отримані функціональні залежності геометричних та кінематичних показників формоутворення зубчастих коліс, відповідного кінематичній схемі формоутворення 2-го класу.

Аналіз зміни геометричних і кінематичних показників під час інтерактивного синтезу зубчастих передач показаний на рис. 12 і рис. 13.



Рис. 12. Інтерактивний аналіз відносної швидкості ковзання

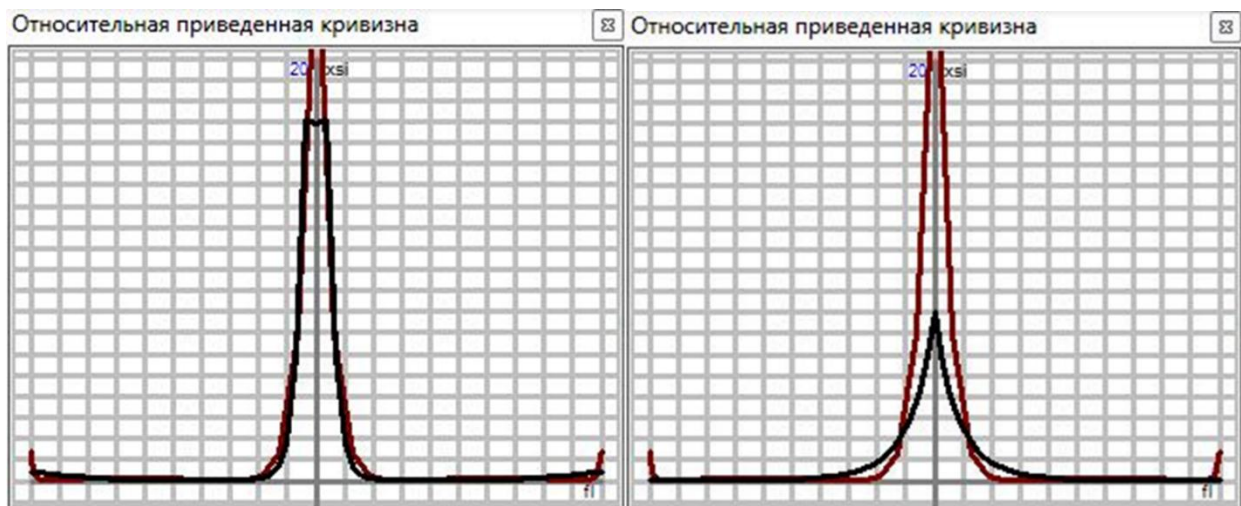


Рис. 13. Аналіз приведеної кривизна поверхонь зубців в напрямку, перпендикулярному лінії контакту

Розроблена математичну модель для комплексного аналізу геометричних та кінематичних показників взаємодії спряжених поверхонь, дозволила ще на стадії проектування аналізувати як умови взаємодії оброблюваних та інструментальних поверхонь, що забезпечують їх виготовлення, так і умови контактування спряжених зубців зубчастих коліс.

**У п'ятому розділі** запропоновано концепцію інтеграції розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс з CAD/CAM/CAE-системами.

Інтерактивне керування автоматизованою системою формоутворення має здійснюватися за допомогою уніфікованих керуючих параметрів, які



змінюють форму вихідної поверхні та кінематичну схему формоутворення. При цьому одночасно змінюються всі елементи системи, включно з геометричними та кінематичними показниками процесу формоутворення. Інтерактивний аналіз цих показників в процесі синтезу служить зворотним зв'язком і допомагає додатково використовувати досвід і знання проектувальника для швидкої оцінки застосовності результату проектування (рис. 14).

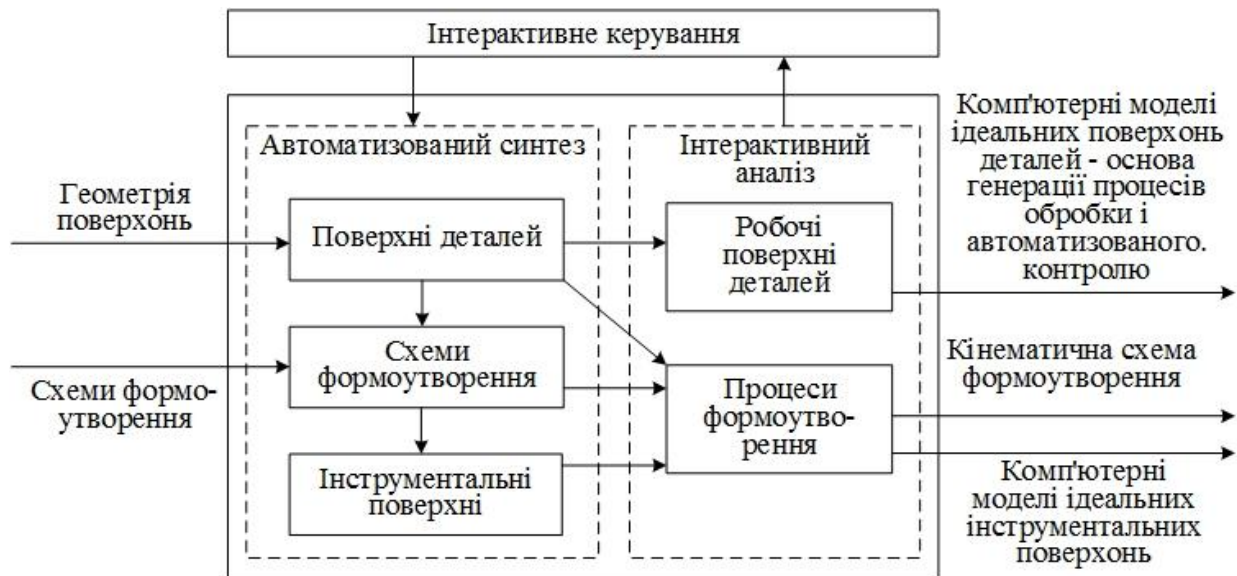


Рис. 14. Комп'ютерно-інтегрована система формоутворення

Розроблено нове методичне, алгоритмічне і програмне забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи формоутворення зубчастих коліс. Програмне забезпечення (ПЗ) «COPTeR» (рис.15) і «COSET» (рис. 16) реалізують можливості інтерактивної зміни геометрії зубчастих коліс за допомогою перетворень простору і безпосередньо за допомогою керуючих уніфікованих елементів кривих, відповідно.

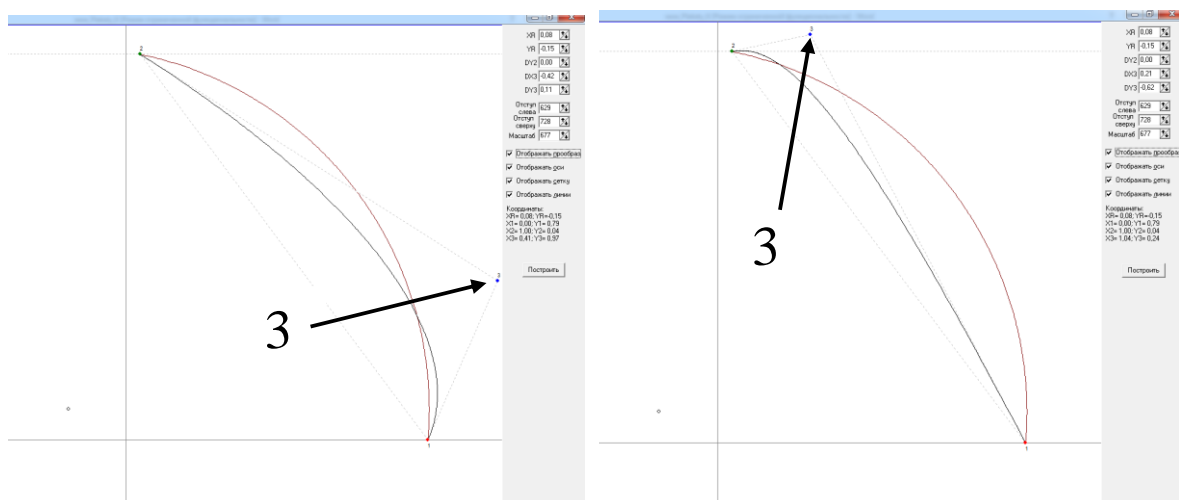


Рис. 15. Перетворення (деформація) дуги кола в шукану криву шляхом перетворення простору (ПЗ «COPTeR»)

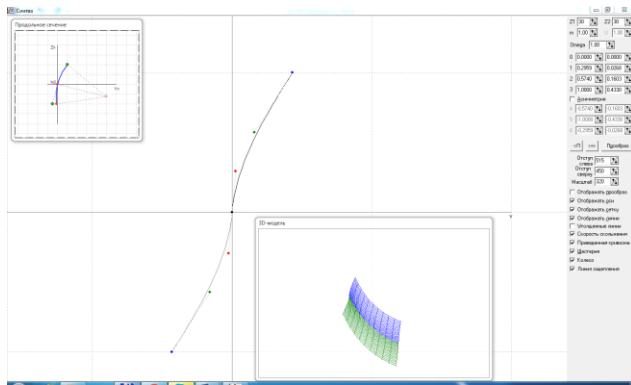


Рис. 16. Результат проектування в ПЗ «COSET»

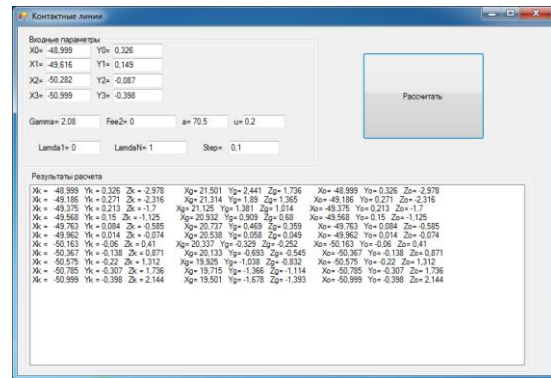


Рис. 17. Результат проектування в ПЗ «SCOT»

Програмне забезпечення «SCOT» (рис.17) дозволяє синтезувати контактні точки робочого і верстатного зачеплення і експортувати їх в CAD-системи, а програмне забезпечення «APACE» (рис. 18) реалізує перетворення заданого математичного опису геометрії поверхонь зубів зубчастих коліс до єдиного функціонального виду.

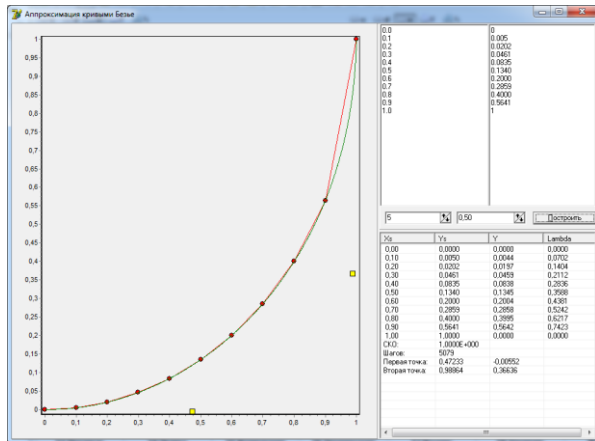
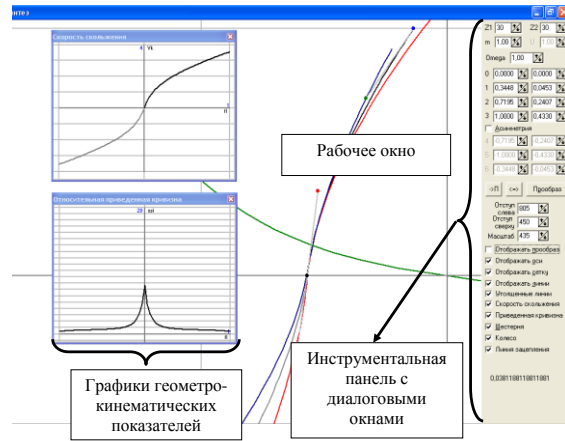


Рис. 18. Результат проектування в ПЗ «APACE»



Для оптимізаційного синтезу вихідних інструментальних поверхонь і поверхонь зубців зубчастих коліс розроблено нове програмне забезпечення «SAAT» (рис. 19), що дозволяє на підставі інтерактивного аналізу геометричних та кінематичних показників в точках контакту спряжених поверхонь в інтерактивному режимі вибирати форму вихідного контуру твірної поверхні і профілю зубців зубчастих коліс.

При використанні розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи формотворення інформація про геометрію формотвірних та формостворюваних елементів передається (рис. 20) в будь-яку CAD-систему для автоматичного редагування існуючих параметричних моделей виробів або подальшої розробки електронного еталона комп'ютерної моделі зубообробного інструменту (рис. 21) або зубчастого колеса (рис. 22). Розроблені електронні еталони комп'ютерних моделей зубчастих коліс і зуборізних інструментів використовуються у промислових CAI-системах, наприклад, PowerInspect фірми Autodesk, які інтегруються в координатно-вимірні комплекси.

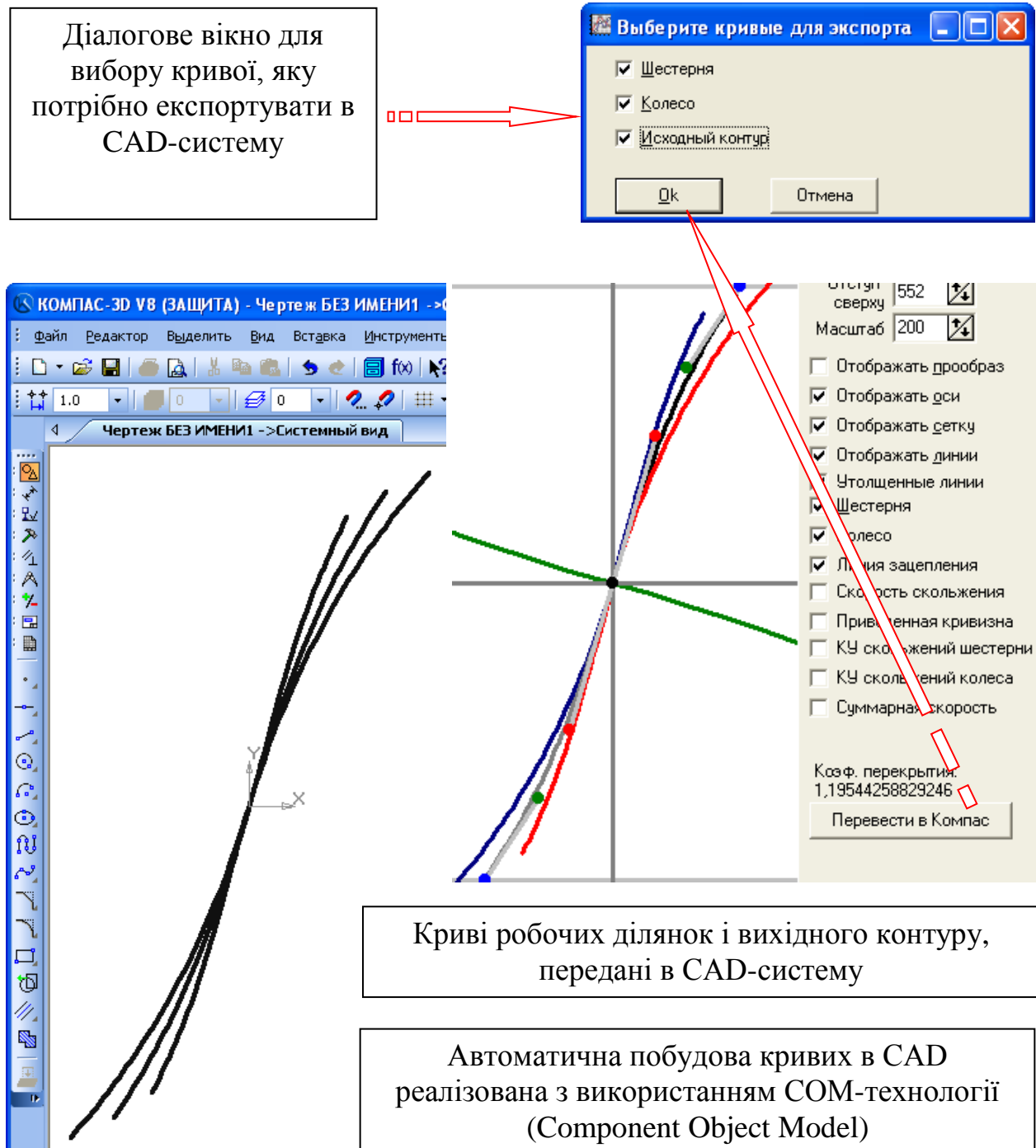


Рис. 20. Інтерфейс передачі геометрії з системи формоутворення у CAD-систему

На основі отриманих комп'ютерних моделей готовий виріб можна отримати двома способами. До першого способу можна віднести адитивні технології виготовлення деталей, що мають складні поверхні. Ці технології базуються не на відділенні об'ємів, що становлять припуск, а на пошаровому нарощуванні об'єктів до досягнення необхідних характеристик.

До другого способу можна віднести технології, при яких по комп'ютерним моделям генеруються керуючі програми для верстатів з ЧПК, а подальше виготовлення ведеться традиційними способами.



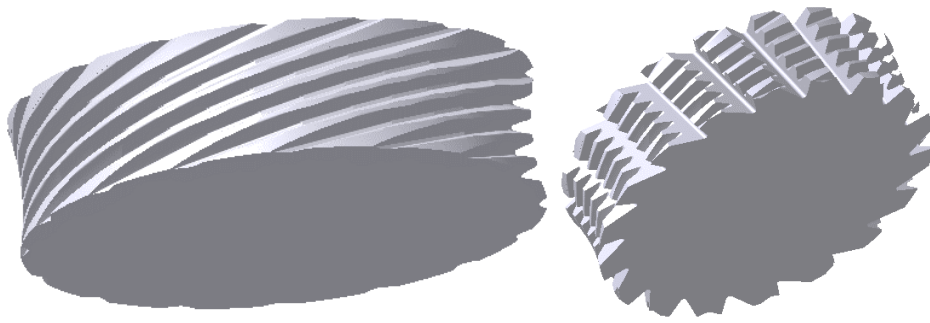


Рис. 21. Модель гіперболоїдного інструменту

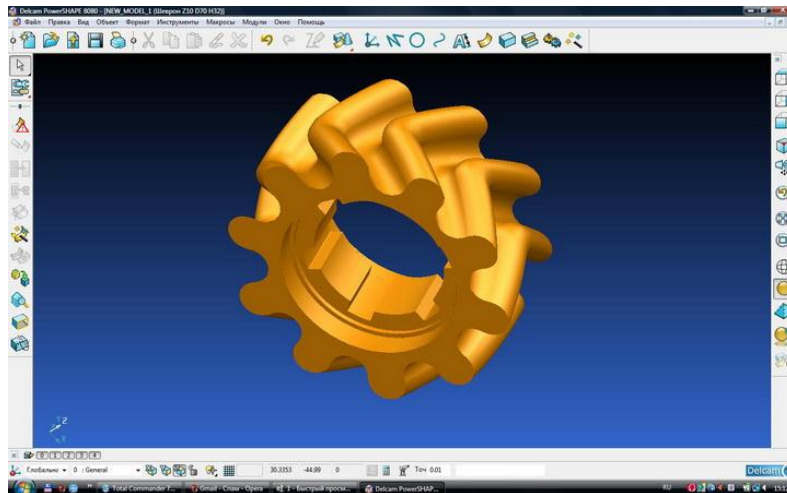


Рис. 22. Візуалізація комп'ютерної моделі шевронного колеса в Autodesk PowerShape

Для виготовлення набору зубчастих коліс використовувалася система Autodesk PowerMill (рис. 23).

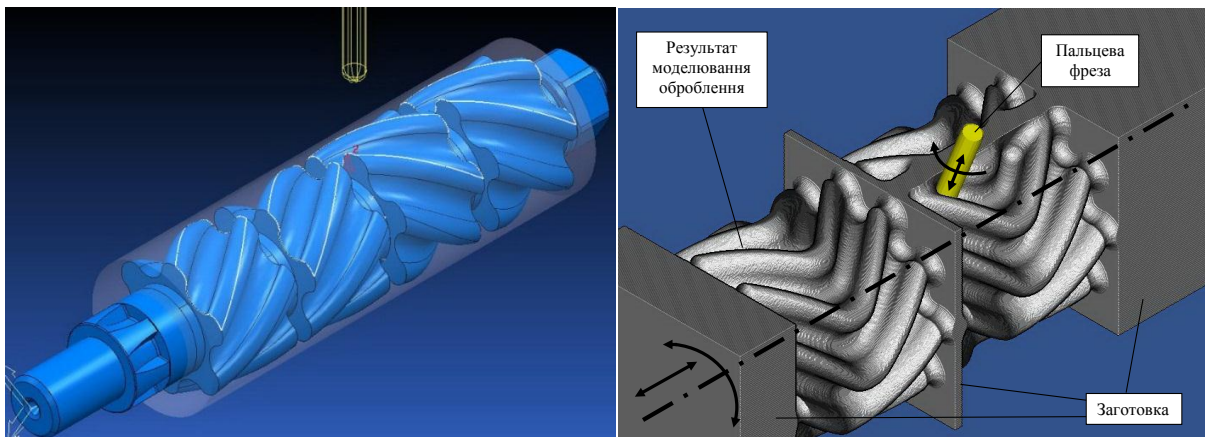


Рис. 23. Комп'ютерна імітація фрезерування зубчастих коліс в Autodesk PowerMill

Змодельовані зубчасті колеса були виготовлені на модернізованому копіювально-фрезерному двошпиндельному верстаті Starrag KF-200 з ЧПК HEIDENHAIN 355 з програмно керованою ділильною головою. Обертання заготовки здійснювалося за допомогою оснащеної кроковим двигуном ділильної головки по керуючій програмі.

Комп'ютерні моделі зубчастих коліс зі складними поверхнями, отримані в результаті використання розробленої системи формоутворення слугують основою для використання адитивних технологій їх виготовлення.

Адитивне створення шевронного зубчастого колеса здійснювалось на принтері Makerbot Replicator 5. Остаточний контроль геометрії отриманого шевронного колеса здійснювався за допомогою KBM FARO Edge ScanArm HD (рис. 24).

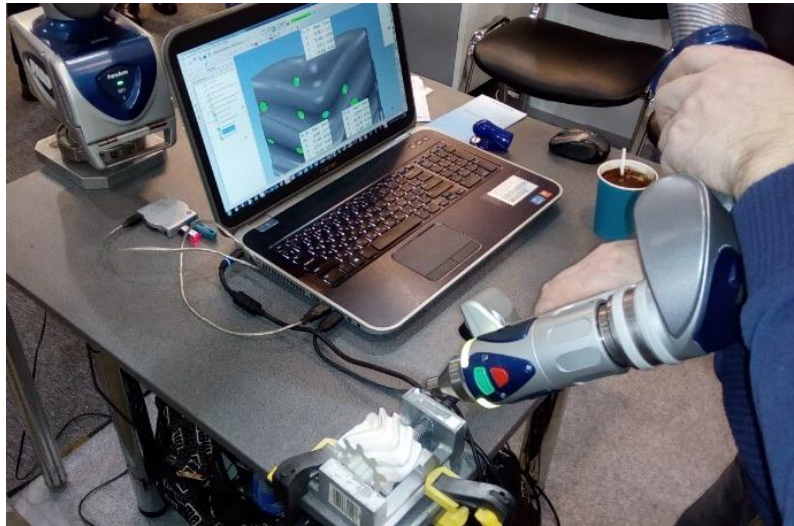


Рис. 24. Контроль геометрії зубчастого колеса

Відсканована хмара точок поверхонь зубців автоматично накладається на поверхню еталонної моделі зубчастого колеса. Причому базування здійснюється за хмарами точок в комп'ютерній програмі Autodesk PowerINSPECT. Результати контрольної операції оформляються у вигляді протоколу, в якому відображаються координати точок і величини відхилень від номінального розміру із зазначенням точок на поверхні колеса в графічному звіті (рис. 25).

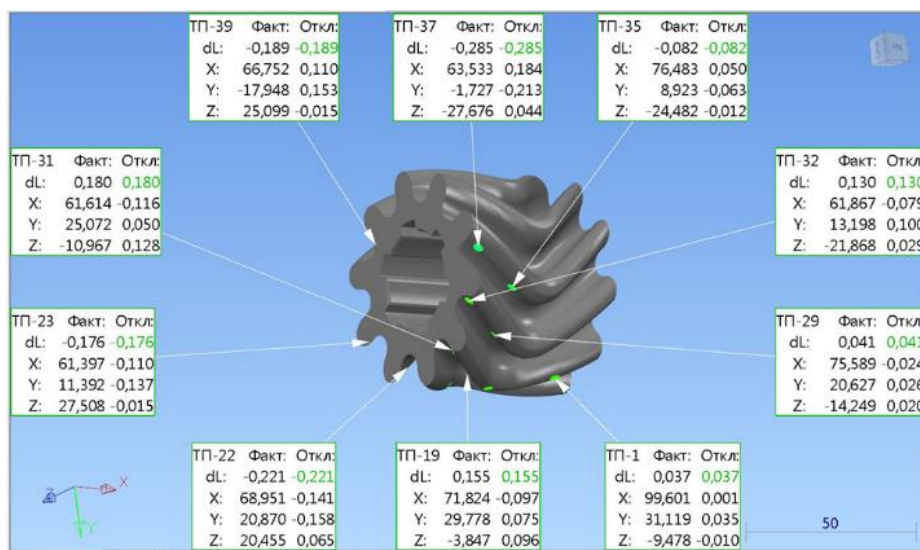


Рис. 25. Візуалізація протоколу вимірювань в комп'ютерній програмі Autodesk PowerINSPECT

Використання єдиних уніфікованих параметрів дозволяє інтегрувати систему формоутворення, що включає попередню оцінку геометрії і кінематики процесу, в автоматизовані системи проектування, виробництва, аналізу і контролю.

У шостому розділі наведені результати впровадження дисертаційної роботи. За допомогою розробленого в роботі математичного, методичного, алгоритмічного і програмного забезпечення були спроектовані і виготовлені шевронні, гвинтові та гіперболоїдні зубчасті колеса (рис. 26, рис. 27), а також, спрофільовані та виготовлені гіперболоїдні інструменти (рис. 29) для механічного оброблення циліндричних зубчастих коліс.



Рис. 26. Фото нарізування зубців гіперболоїдного колеса на верстаті «Pfauter»



Рис. 27. Фото гіперболоїдних зубчастих коліс

Для того, щоб перетворити гіперболоїдну заготовку з нарізаними витками в гіперболоїдну фрезу, необхідно фрезерувати стружкові канавки (рис. 28).



Рис. 28. Фрезерування стружкових канавок



Рис. 29. Фото гіперболоїдних фрез для нарізування циліндричних зубчастих коліс

На рис. 29 наведені різні конструкції виготовлених гіперболоїдних фрез для нарізування циліндричних зубчастих коліс. Практично, було підтверджено, що такий інструмент не вимагає затилування, що знижує собівартість його виготовлення до 70%. Крім того, використання



багатозахідних гіперболоїдних фрез замість черв'ячних дозволяє підвищити продуктивність нарізування зубців до 30%.

На способи формоутворення зубчастих коліс, зубчасті передачі та зуборізний інструмент отримані патенти України №25543А, №25541А, №29761А, №68546).

В роботі наведено технологічний процес виготовлення гіперболоїдних зуборізних довбачів, гіперболоїдного інструменту для фінішного оброблення зубчастих коліс таких, як шліфувальні круги та гіперболоїдні накатники.

Практичні результати дисертаційної роботи впроваджені у виробничий процес ДП «ЛОРТА» концерну «Укроборонпром» та ТОВ «НДІ «Редуктор».

Застосування програмного забезпечення для синтезу та аналізу складних поверхонь деталей спеціального призначення дозволило аналізувати їх зношування та вирішувати задачі формоутворення. Результатом використання даного програмного забезпечення стало скорочення витрат нормо-годин на технологічне проектування на 25%–30%.

Також була впроваджена методика інтерактивного синтезу та програмне забезпечення процесу формоутворення складних поверхонь з наступним аналізом їх геометричних та кінематичних показників, які характеризують властивості окремих поверхонь та виробу в цілому в потенційних умовах його експлуатації.

Впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи для автоматизації проектування планетарних мотор-редукторів 6МП-25 – 6МП-125 на АТЗТ «НДІ «Редуктор» призвело до скорочення строків розробки на 10%-15% з річним економічним ефектом 20 тис. грн. Удосконалення зубооброблювального інструменту типу «однопорожнинний гіперболоїд» для оброблення зубчастих коліс дозволило знизити витрати на 8% з річним економічним ефектом 216 тис. грн.

Результати роботи впроваджені в навчальний процес СНУ ім. В. Даля та КПІ ім. Ігоря Сікорського.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі в результаті комплексних досліджень процесу формоутворення зубчастих коліс в частині інтерактивного керування формою поверхні, параметризації функції формоутворення для різних кінематичних схем, аналізу геометричних та кінематичних показників як процесу формоутворення, так і взаємодії зубців зубчастих коліс, реалізована комп'ютерно-інтегрована система забезпечення формоутворення зубчастих коліс, в основу якої покладено уніфіковані керуючі параметри системи формоутворення, її елементів, якісних показників, що забезпечує можливість розробки автоматизованих систем забезпечення формоутворення зубчастих коліс та їх інтеграцію в системи автоматизованого проектування, виробництва, аналізу та контролю.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному:

1. Аналіз стану та перспектив розвитку теорії формоутворення зубчастих коліс при механічній обробці показав, що на сучасному етапі розвитку комп'ютерних технологій на основі синтезу теорії формоутворення, теорії зубчастих зачеплень і теорії поверхонь існують потреби і умови створення високоефективних систем формоутворення зубчастих коліс, що дозволяють значно прискорити процес проектування зубчастих коліс, знизити матеріальні та часові витрати за умови забезпечення якості.

2. Реалізація на єдиній математичній базі та уніфікованих керуючих параметрах комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечення формоутворення зубчастих коліс дозволила автоматизувати процес формоутворення та інтерактивне керування всіма елементами системи формоутворення з одночасним аналізом його ефективності.

3. Математичний опис поверхні, приведений до універсального виду на базі уніфікованих керуючих параметрів, забезпечує апроксимацію точкового подання цих поверхонь сплайновими поверхнями і створює основу для використання єдиних методичного, алгоритмічного і програмного забезпечення автоматизації процесу формоутворення, що в сукупності забезпечило як підвищення точності опису та виготовлення функціональних поверхонь зубчастих коліс і зубообробного інструменту, так і підвищення ефективності технології виготовлення та контролю.

4. Інтерактивне керування формоутворенням зубчастих коліс в залежності від поставлених завдань можна здійснювати двома способами: шляхом перетворення простору разом з вихідною кривою, що описує профіль або функціональну поверхню; шляхом зміни внутрішніх параметрів, що визначають профіль зубчастих коліс.

5. Для узагальнення математичного опису функції формоутворення доцільно використовувати матричне подання, яке дозволяє переходити від одного класу схеми формоутворення до іншого в інтерактивному режимі.

6. Отримані математичні залежності функції формоутворення стосовно часткових випадків кінематичних схем формоутворення 3-го класу, зокрема кочення з ковзанням гіперболоїда по циліндру і кочення з ковзанням гіперболоїда по твірній прямій, використання яких створило основу удосконалення інструментів типу «однопорожнинний гіперболоїд».

7. Використання геометричних та кінематичних показників, які функціонально залежні від єдиних уніфікованих керуючих параметрів для оцінювання процесу формоутворення та якісних параметрів зубчастих коліс дозволило оцінювати процес безпосередньо під час інтерактивного аналізу формоутворення зубчастих коліс.

8. Використання єдиних уніфікованих параметрів системи формоутворення дозволяє інтегрувати систему формоутворення, що включає попередню оцінку геометрії та кінематики процесу формоутворення, в автоматизовані системи проектування, виробництва, аналізу та контролю.

9. Методичне, алгоритмічне і програмне забезпечення для інтерактивного керування формоутворенням поверхонь, уніфікації керуючих параметрів, визначення контактних точок, синтезу і оптимізації складних

поверхонь зубчастих коліс і зубооброблювальних інструментів, засновані на отриманих в роботі математичних залежностях, дозволили розробити комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс з можливістю автоматизованого проектування та інтерактивного керування.

10. Нове програмне забезпечення для аналізу та синтезу складних поверхонь, використане для проектування деталей спеціального призначення, дозволило скоротити витрати часу на технологічне проектування на 25-30%, кількість помилок на етапі технологічного проектування, підвищити ефективність роботи технологів і продуктивність механічного оброблення деталей зі складною поверхнею в середньому на 12%.

11. Використання комп'ютерно-інтегрованої системи в ТОВ НДІ «Редуктор» для автоматизації проектування планетарних мотор-редукторів 6МП-25 – 6МП-125 призвело до скорочення строків розробки на 10%-15% з річним економічним ефектом 20 тис. грн., а удосконаленого зубооброблювального інструменту типу «однопорожнинний гіперболоїд» для оброблення зубчастих коліс дозволило знизити витрати на інструмент на 8% з річним економічним ефектом 216 тис. грн. Сумарний економічний ефект від впровадження склав 236 тис. грн.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петров А.С. Использование новых информационных технологий при создании деталей сложной формы / А.С. Петров, Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междун. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – Вып.8. – С.170 – 173. (запропоновано алгоритм і отримані твердотільні моделі колеса і шестерні тягової передачі, які мають різну геометрію поверхонь зубців).

2. Воронцов Б.С. Создание трехмерных твердотельных моделей тяжело нагруженных колес с бочкообразными зубьями / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, Д.А. Чаплинский // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.– Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2003. – №9 (67). -С.231 – 235. (розроблено прикладну бібліотеку, яка дозволяє автоматизувати процес створення твердотільних моделей зубчастих коліс з бочкоподібними зубцями по перетинах).

3. Воронцов Б.С. Концептуальные вопросы интеграции конструкторских и технологических систем автоматизированного проектирования / Б.С. Воронцов, Л.И. Жукова, Д.А. Чаплинский // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2003. – №11(69). - С.194 – 198. (розроблено алгоритм інтеграції конструкторських і технологічних систем автоматизованого проектування).

4. Бочарова И.А. Управляемый синтез зубчатых передач со скрещивающимися осями / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А.Кириченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2005. – №7 (89) – С. 34

– 36. (розроблено механізм оперативного управління геометрією передач в інтерактивному режимі).

5. Дорошенко Ю.О. Політканинні перетворення у конструюванні профілю вихідного контуру зуборізного інструменту / Ю.О. Дорошенко, І.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2005. – Вип.11. – С. 68 – 74. (отримано аналітичні залежності для управління геометрією профілю зуборізного інструменту з використанням апарату політканевих перетворень).

6. Воронцов Б.С. Моделирование гиперболоидных инструментов с использованием CAD – систем / Б.С. Воронцов, В.А. Витренко, И.А. Бочарова, И.А. Кириченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – Вип. 17. – С. 318 – 323. (запропоновано алгоритм твердотілого моделювання гіперболоїдних інструментів для виготовлення різних типорозмірів циліндричних зубчастих коліс).

7. Бочарова І.А. Модифікація твірної поверхні з використанням кривої Безьє третього порядку / І.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. – Вип. 4, т.30.– С. 116 – 120. (запропоновано методику здійснення геометричної модифікації твірної поверхні з використанням кривих Безьє третього порядку).

8. Воронцов Б.С. Допоміжні ділянки вихідного контуру зубчастих коліс / Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2005. – Вип.13. – С. 179 – 185. (отримані математичні залежності, які дозволяють забезпечити автоматичну побудову допоміжних ділянок вихідного контуру зубчастих коліс).

9. Бочарова І.А. Зуботочение цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко, В.Н. Пилипенко // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжн. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 30. – С.32 – 36. (отримано комп'ютерні моделі інструментів, задні поверхні яких не мають затилування).

10. Воронцов Б.С. Интерактивное управление синтезом зубчатых передач / Б.С. Воронцов // Вестник национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. трудов. Тематический выпуск «Проблемы механического привода». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – №40. – С. 182 – 187.

11. Воронцов Б.С. Компьютерное управление геометрией зубьев зубчатых колес и зуборезных инструментов / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Збірник наукових праць Київського національного університету технологій та дизайну: міжвід. наук.– техн. збірник. – К.: ДОП КНУТД, 2005. – С.184 – 189. (отримано аналітичні залежності, що описують твірну поверхню і визначають відповідні їй геометро-кінематичні показники).

12. Воронцов Б.С. Производящая поверхность реечного типа с изменяемой продольной формой зуба / Б.С. Воронцов, Т.Н. Чаплинская //

Системні технології: Регіональний міжвуз. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 2 (43). – С.53 – 56. (розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє управляти поздовжньої лінією зубців при синтезі циліндричних передач з арковими і двоопукло-увігнутими зубцями).

13. Воронцов Б.С. Гиперболоидные инструменты для изготовления цилиндрических колес с произвольным профилем зуба / Б.С.Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – Вип. 19. – С.76 – 81.

14. Воронцов Б.С. Взаємообвідні поверхні циліндричних передач з круговою лінією зубців / Б.С. Воронцов, Т.М. Чаплинська // Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2006. – Вип. 4, т. 33. – С. 130 – 135. (розроблено математичний апарат і комп'ютерну програму для зміни поздовжньої форми зубців за допомогою керуючих елементів).

15. Воронцов Б.С. Гиперболоидные передачи с управляемым исходным контуром производящего колеса / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006 – №22. – С. 56 – 60.

16. Воронцов Б.С. Визуальный динамический синтез сопряженных поверхностей / Б.С. Воронцов // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2006. – Вип.15.– С. 107– 113.

17. Витренко В.А. Технологические особенности изготовления гиперболоидного инструмента для финишной обработки зубчатых колес / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко, А.В. Лейба, В.Н. Пилипенко // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжн. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 32. – С.64 – 68. (отримано профіль гіперболоїдного багатозахідного шліфувального круга, що описується за допомогою циліндричного зубчастого колеса в просторовому верстатному зачепленні).

18. Воронцов Б.С. Профилирование зубьев производящего колеса на основе геометрических преобразований / Б.С.Воронцов // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля.– Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2006. – №3 (97). – С. 31 – 36.

19. Воронцов Б.С. Компьютерное формообразование твердотельных моделей гиперболоидных инструментов / Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – Вип. 21. – С.298 – 302.

20. Воронцов Б.С. Особенности твердотельного компьютерного моделирования гиперболоидных передач / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №21. – С. 249 – 254.

21. Витренко В.А. Технологические особенности проектирования и изготовления гиперболоидных колес / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов //



Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 34. – С.47 – 53. (отримано конструктивні параметри гіперболоїдних коліс і спроектованих на їх базі інструментів).

22. Воронцов Б.С. Автоматизированная система синтеза передач зацеплением / Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский, А.В. Витренко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – Вип. 23. – С.133 – 138. (розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє здійснювати апроксимацію таблично представлених кривих, що описують вихідні контури).

23. Воронцов Б.С. Унификация геометрии рабочих поверхностей зубьев при синтезе передач зацеплением / Б.С.Воронцов, И.А.Бочарова, Д.А.Чаплинский // Вісник Національного Технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2008. – №29. – С. 24 – 28. (виконано аналіз комп'ютерно-графічного і аналітичного способів апроксимації таблично представлених профілів кривими Безье третього порядку).

24. Воронцов Б.С. Единая информационная модель конструкторских и технологических систем автоматизированного проектирования / Б.С. Воронцов, Л.И. Жукова, Д.А. Чаплинский // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. праць. – Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2008. – С.139 – 142. (проаналізовано можливості сучасних систем автоматизованого проектування при моделюванні складних поверхонь деталей).

25. Воронцов Б.С. Повышение эффективности единичного производства сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, В.А. Витренко, С.Б. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – Вип. 24. – С. 227 – 231. (запропоновано спосіб отримання, аналізу та вдосконалення твердотільних комп'ютерних моделей деталей зі складною геометрією).

26. Воронцов Б.С. Синтез и изготовление сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, Д.А. Чаплинский // Вісник Національного Технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2009. – №20. – С. 54 – 59. (розроблено програмне забезпечення для синтезу складнопрофільних зубчастих коліс з поліпшеними експлуатаційними властивостями).

27. Бочарова И.А. Накатка зубьев цилиндрических колес методом ПДУ / И.А. Бочарова, О.С. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Вестник двигателестроения: научно– технич. журнал. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2009. – №2. – С. 102 – 105. (отримано оптимальні параметри накатного інструменту і визначена його конструкція).

28. Бочарова И.А. Особенности формообразования зубчатых колес для гиперболических передач / И.А. Бочарова, А.В. Витренко, Б.С. Воронцов// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб.

наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 26. – С. 50 – 53. (розроблено алгоритм поверхневого і твердотільного комп'ютерного моделювання передач з осями, що схрещуються).

29. Воронцов Б.С. Математическое обеспечение интерактивного синтеза передач зацеплением / Б.С. Воронцов // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – №27. – С. 49 – 54.

30. Воронцов Б. С. Анализ условий контактирования гиперболоидного инструмента и изготавливаемого колеса в системе PowerSHAPE / Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – Вип. 28. – С. 291 – 298.

31. Витренко В.А. Поверхностное моделирование гиперболоидных инструментов в системе PowerSHAPE / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко // Вісник Національного Технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №29. – С. 30 – 35. (розроблено алгоритм і методику поверхневого моделювання зубців гіперболоїдних інструменту).

32. Витренко В.А. Формообразование зубьев многозаходных зубообрабатывающих инструментов / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова, В.В. Черновол // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Львівська політехніка, 2011. – Вип. 713. – С.3 – 6. (розроблено принципово нову схему формоутворення гіперболоїдних зуборізних фрез і долбиків).

33. Витренко О.С. Исследование процесса формообразования гиперболоидных зубчатых колес при помощи инструментального зубчатого колеса / О.С. Витренко, И.А. Кириченко, Б.С. Воронцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – Вип. 30. – С. 188 – 194. (розроблено ряд нових схем формоутворення гіперболоїдних зубчастих коліс з різним кутом нахилу зубців і збільшеним коефіцієнтом перекриття).

34. Воронцов Б.С. Использование унифицированных параметров при автоматизации проектирования зубчатых передач / Б.С. Воронцов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Львівська політехніка, 2012. – Вип. 746. – С.180 – 185.

35. Витренко О.С. Накатка зубьев зубчатых колес при помощи гиперболоидных накатников / О.С. Витренко, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – Вип. 32. – С. 203 – 208. (проведено дослідження профілю зубців, які отримані за допомогою гіперболоїдних накатників).

36. Вітренко В.О. Профілювання зубооброблювального обкатного інструменту / В.О. Вітренко, Б.С. Воронцов, І.А.Бочарова // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Львівська політехніка, 2014. – Вип. 772. – С.56 – 59. (отримані у теоретичному вигляді та обґрунтовані гіперболоїдні обкатні інструменти, які одержані за допомогою інструментальної поверхні, що повністю співпадає з поверхнею формоутворюючого зубчастого колеса).

37. Воронцов Б. С. Компьютерная интеграция систем и процессов формообразования при механической обработке / Б.С. Воронцов, В.А. Пасечник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 17 – 23. (розроблено принципово нові принципи комп'ютерної інтеграції систем формоутворення зубчастих коліс)

38. Vitrenko V.A. Rolling of teeth of cylindrical teeth– wheels / V.A. Vitrenko, B.S. Vorontsov, I.A Kirichenko // Les technologies modernes de l'industrie mecanique et les problemes de la formation des cadres d'ingenieurs. – Mahdia (Tunisie) UNTD, 2008. – P. 77 – 80. (отримано математичні залежності для моделювання та аналізу накатного інструменту) (іноземне видання).

39. Воронцов Б.С. Современные проблемы оптимизации передач со скрещающимися осями / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, А.Б. Воронцов // Вестник СевНТУ: сб. науч. трудов. Серия: Машиноприборостроение и транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – Вып.107. – С. 41 – 44. (розроблено математичне забезпечення та запропонована методика синтезу передач з осями, що схрещуються) (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

40. Витренко В.А. Особенности изготовления зуборезных долбяков / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2011. - Вып.117. – С. 27 – 31. (запропоновано нову геометрію зуборізних долбяків, основна інструментальна поверхня яких базується на тілі типу «одноплощинний гіперболоїд») (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

41. Воронцов Б.С. Совершенствование кинематических схем формообразования зубообрабатывающего инструмента / Б.С. Воронцов, В.А. Витренко, М.Н. Кузнецова // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – Вып.129. – С. 40 – 45. (зроблено аналіз четвертого типу кінематичної схеми формоутворення третього класу, в основі якого лежить взаємодія оксоїдов циліндра і тіла, типу «одноплощинний гіперболоїд») (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

42. Витренко О.С. Вопросы формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках / О.С. Витренко, Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць.

Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №36. – С. 25 – 28. (розроблено принципово нову гвинтову зубчасту передачу з лінійним контактом зубців і передаточним відношенням менше восьми) (індексується в міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals, Google Scholar).

43. Vitrenko A.V. Vytvorenie tvare hyperboloidu šípových ozubených kolies s lineárnou povahou zubov dotyk / A.V. Vitrenko, B.S. Vorontsov, M. Boshanski // Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie 2013 pri príležitosti 44. výročia založenia Technickej fakulty SPU v Nitre a 20. Medzinárodného stojárskeho veľ'trhu v Nitre: zborník vedeckzch prac. – Nitra (Slovensko), 2013. – С. 64 – 68. (зроблено аналіз п'ятна контакту циліндро-гіперболоїдних зубчастих передач з різним числом зубів) (іноземне видання).

44. Витренко В.А. Разработка технологии изготовления винтовых зубчатых колес на универсальном оборудовании / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Н. Семьянистая // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – Вып.139. – С. 33 – 37. (розроблено методику виготовлення зубців на заготовці, типу «однополостний гіперболоїд обертання») (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

45. Витренко В.А. Вопросы совершенствования технологии формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках / В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, И.А. Бочарова // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №41. – С. 27 – 31. (розроблено математичне забезпечення процесу формоутворення гвинтових зубчастих коліс на стандартному універсальному обладнанні з ЧПУ за допомогою кінцевих фрез) (індексується в міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals, Google Scholar).

46. Антонюк В.Е. Модификация зубчатых зацеплений как средство повышения показателей качества и нагрузочной способности зубчатых передач / В.Е. Антонюк, Б.С. Воронцов, В.Е. Старжинский, В.А. Белый, В.В. Супин // Теория и практика зубчатых передач. – Ижевск (Россия): ИжГТУ, 2014. – С. 285– 301. (розроблено програму автоматизованого розрахунку, що дозволяє здійснювати багатокритерійний інтерактивний синтез передач зацепленням) (іноземне видання).

47. Кривошея А.В. Разработка концепции, структуры и принципов создания и функционирования новой технической системы синтеза зубчатых передач / А.В. Кривошея, М.Г. Сторчак, Ю.М. Данильченко, Н.Э. Тернюк, Б.С. Воронцов, А.В. Устиненко // Вісник Національного Технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – №34(1143). – С. 64 – 74. (розроблено концепцію, структуру і принципи створення і функціонування нової технічної системи синтезу зубчастих зацеплень) (індексується в міжнародних базах даних: WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals).

48. Воронцов Б.С. Совершенствование математических моделей задания и теоретического формообразования зубчатых передач с использованием глобальной сплайн-интерполяции / Б.С. Воронцов, А.В. Кривошея, В.Е. Мельник, Т. Е. Третьяк // Вісник Національного Технічного університету "ХП": зб. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». – Харків: НТУ «ХП», 2017. – №25 (1247). – С. 19 – 24. (отримано математичні залежності для узагальненого опису повного профілю зубчастих коліс) (індексується в міжнародних базах даних: WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals).

49. Пат. №25543А. Україна, МКИ F16H1/08. Зубчата передача / Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97041926; заявл. 22.04.97; опубл. 25.12.98; Бюл. №6.

50. Пат. №25541А. Україна, МКИ B23F1/00. Спосіб обробки бочкоподібних зубців / Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97052065; заявл. 05.05.97; опубл. 25.12.98; Бюл. №6.

51. Пат. №29761А. Україна, МКИ B23F1/00, B23F21/00. Спосіб нарізування зубчатих коліс з двогнутими зуб'ями та інструмент для його здійснення/ Воронцов Б.С.; заявник і патентовласник Східноукраїнський державний університет. – №97052444; заявл. 27.05.97; опубл. 15.11.2000; Бюл.№6–II.

52. Пат. №68546. Україна, МПК B23F 9/00. Спосіб нарізування гіперболоїдних зубчастих коліс та інструментів / Вітренко О.В., Воронцов Б.С., Кириченко С.Г., Кузнецова М.М.; заявник і патентовласник Вітренко О.В., Воронцов Б.С., Кириченко С.Г., Кузнецова М.М. – №u201111822; заявл. 07.10.2011; опубл. 26.03.2012; Бюл.№6.

53. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70762. Комп'ютерна програма «SCOT»/ Б.С. Воронцов, С.Б Воронцов. – №71352; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

54. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70763. Комп'ютерна програма «COPTeR»/ Б.С. Воронцов, Д.О. Чаплинський. – №71353; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

55. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70764. Комп'ютерна програма «APACE»/ Б.С. Воронцов, Д.О. Чаплинський. – №71354; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

56. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70765. Комп'ютерна програма «SAIAT»/ Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова, Д.О. Чаплинський. – №71355; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

57. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70766. Комп'ютерна програма «COSET»/ Б.С. Воронцов, Т.М. Чаплинська, Д.О. Чаплинський. – №71356; заявл. 10.01.2017; опубл. 01.03.2017.

58. Воронцов Б.С. Проектирование зуборезного инструмента при помощи системы Pro/ENGINEER / Б.С. Воронцов, В.И. Быковский // Междунар. сб. науч. тр. "Прогрессивные технологии и системы машиностроения" [Спец.выпуск]: V междунар. науч.-техн. конф.

"Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века", 8-11 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонГТУ, 1998. - Вып.6, т.1. – С. 166 – 169.

59. Воронцов Б.С. Применение CAD/CAM/CAE/PDM - систем для моделирования тяговых передач / Б.С. Воронцов // Проблемы развития рельсового транспорта: VIII междунар. науч.-техн. конф., 21-25 сент. 1998 г.: тезисы докл. – Алушта: ВУГУ, 1998. – С.57 – 58.

60. Петров А.С. Использование новых информационных технологий при создании деталей сложной формы / А.С. Петров, Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: междунар. науч.-техн. конф. 13 – 18 сент. 1999 г.: тезисы докл. – Севастополь: Дон ГТУ, 1999.– Т 2. – С. 254 – 257.

61. Ткаченко В.П. Методы твердотельного моделирования зубчатых колес тяговых передач / В.П. Ткаченко, И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Проблемы развития рельсового транспорта: IX междунар. науч.-техн. конф., 13 – 17 сент. 1999 г.: тезисы докл. – Алушта: ВУГУ, 1999. – С. 12.

62. Бочарова И.А. Твердотельное компьютерное моделирование зубчатых колес с модифицированными зубьями / И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский // Сучасні інформаційні технології в освіті та промисловості: II міжнар. наук.-техніч. конф., 17 – 21 листоп. 2003 р.: тези доп. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – С.16-17.

63. Дорошенко Ю.О. Застосування політканинних перетворень у задачах синтезу зубчастих передач / Ю.О. Дорошенко, Б.С. Воронцов, І.А. Бочарова // Інформаційно-комунікаційні технології у середній і вищій школі: міжнар. наук.-практичної конф., 27 – 29 травня 2004 р.: тези доп. – Ізмаїл, 2004. – С. 112 – 113.

64. Бочарова И.А. Управляемый синтез зубчатых передач со скрещающимися осями / И.А. Бочарова, В.А. Витренко, Б.С. Воронцов, И.А. Кириченко // Машиностроение и техносфера XXI века: междунар. науч.-техн. конф., 13 – 18 сент. 2004 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонНТУ, 2004. – Т.1. – С. 87 – 90.

65. Vorontsov B.S. Improving the efficiency of CAD / CAM / CAE gear systems / B.S. Vorontsov, D.A. Chaplinsky // The Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes (IQRUTSTP): VI International Conference, December 2-9, 2007. – Hurghada (Egypt), 2007. – P. 129 – 131.

66. Воронцов Б.С. САПР зубчатых передач / Б.С. Воронцов, Д.А. Чаплинский, А.В. Витренко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VI міжнар. наук.-техн. конф., 2 – 5 червня 2008 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – С.20 – 21.

67. Витренко В.А. Гиперболоидный инструмент для нарезания зубьев / В.А. Витренко, Б.С.Воронцов, А.В. Лейба, Д.А. Чаплинский // Машиностроение и техносфера XXI века: XV междунар. науч.-техн. конф., 15-20 сент. 2008 г.: тезисы докл. – Севастополь: ДонНТУ, 2008. – Т. 1. – С. 184 – 188.

68. Воронцов Б.С. Использование программного комплекса Power

Solution для изготовления сложнопрофильных зубчатых колес / Б.С. Воронцов, И.А. Бочарова, В.А. Витренко, С.Б. Воронцов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VII міжнар. наук.-техн. конф., 2 – 5 червня 2009 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – С.17 – 18.

69. Витренко В.А. Формообразование зубьев колес гиперболоидных передач / В.А. Витренко, И.А. Бочарова, Б.С. Воронцов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: VIII міжнар. наук.-техн. конф., 1 – 4 червня 2010 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – С.23.

70. Воронцов Б.С. Использование теории сплайнов при поверхностном моделировании гиперболоидных инструментов / Б.С. Воронцов, М.А. Кашура, В.В. Черноволов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: IX міжнар. наук.-техн. конф., 31 травня – 3 червня 2011 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – С.33 – 34.

71. Воронцов Б.С. Исследование схем формообразования накатного инструмента / Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко, М.Н. Кузнецова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XI міжнар. наук.-техн. конф., 4 – 6 червня 2013 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – С.34.

72. Воронцов Б.С. Формообразование зубчатых колес с линейным характером касания зубьев / Б.С. Воронцов, М.Н. Кузнецова // Машинобудування – очима молодих: міжнар. наук.-техн. конф., 30 жовт. – 1 листоп. 2013 р.: тези доп. – Кременчук: КрНУ ім. М. Остроградського, 2013. – С.10.

73. Воронцов Б.С. Формоутворення гіперболоїдних фрез / Б.С. Воронцов, В.О. Вітренко, С.Г. Кириченко // Прогресивні технології в машинобудуванні: всеукр. наук.-техн. конф., 10 – 15 лют. 2014 р.: тези доп. – Львів: Львівська політехніка, 2014. – С. 19.

74. Воронцов Б.С. Наукові основи технології реінжинірингу зубчастих зачеплень / Б.С. Воронцов, В.А. Пасічник // Прогресивні технології в машинобудуванні: VI міжнар. наук.-техн. конф., 6 – 10 лют. 2017 р.: тези доп. – Львів: Львівська політехніка, 2017. – С. 28 – 30.

75. Pasichnyk V. Reengineering gear based on the model of unified description parameter / V. Pasichnyk, B. Vorontsov // Technika I Technologia Montażu Maszyny (TTVV-2017): IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, 6-9 czerwca 2017. – Rzeszów–Czarna. – P.49.

76. Воронцов Б.С., Автоматизация процессов формообразования при механической обработке сложных поверхностей / Б.С. Воронцов, В.А. Пасічник // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XV міжнар. наук.-техн. конф., 30 травня – 1 червня 2017 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – С.17.

## АНОТАЦІЯ

Воронцов Б.С. **Комп'ютерно-інтегрована система забезпечення формоутворення зубчастих коліс.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018.

В дисертаційній роботі визначена, науково обґрунтована і вирішена актуальна науково-технічна проблема – забезпечення якості, в першу чергу, кінематичної точності та плавності роботи зубчастих коліс, а також, скорочення термінів технологічного підготовки їх виробництва шляхом створення комп'ютерно-інтегрованої системи, в основу якої покладено уніфіковані керуючі параметри, що забезпечують формоутворення зубчастих коліс, які мають різну форму профілю зуба, з можливістю автоматизованого проектування, інтерактивного керування та візуалізації результатів. Розроблено математичну модель системи формоутворення зубчастих коліс, яка базується на узагальненому представленні функції формоутворення.

На основі запропонованих теоретичних та методологічних положень розроблено комп'ютерно-інтегровану систему забезпечення формоутворення зубчастих коліс. Результати роботи впроваджено у виробництво, зокрема з використанням розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи спрофільовані та виготовлені гіперболоїдні інструменти для виготовлення зубчастих коліс з уніфікованим профілем зубців.

**Ключові слова:** механічна обробка, зубчасті колеса, формоутворення, зубооброблювальний інструмент, комп'ютерна інтеграція, автоматизований процес проектування, інтерактивне керування.

## АННОТАЦИЯ

Воронцов Б.С. **Компьютерно-интегрированная система обеспечения формообразования зубчатых колес.** - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.01 - процессы механической обработки, станки и инструменты. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Министерства образования и науки Украины, Киев, 2018.

В диссертационной работе определена, научно обоснована и решена актуальная научно-техническая проблема - обеспечение качества, в первую очередь, кинематической точности и плавности работы зубчатых колес, а также сокращение сроков технологического подготровка их производства



путем создания компьютерно-интегрированной системы, в основу которой положены унифицированные управляющие параметры, обеспечивающие формообразование зубчатых колес, которые имеют разную форму профиля зуба, с возможностью автоматизированного проектирования, интерактивного управления и визуализации результатов. Разработана математическая модель системы формообразования зубчатых колес, которая базируется на обобщенном представлении функции формообразования.

На основе предложенных теоретических и методологических положений разработана компьютерно-интегрированная система обеспечения формообразования зубчатых колес. Результаты работы внедрены в производство, в частности, с использованием разработанной компьютерно-интегрированной системы, спрофилированные и изготовлены гиперboloидные инструменты для нарезания зубчатых колес с унифицированным профилем зубьев.

**Ключевые слова:** механическая обработка, зубчатые колеса, формообразование, зубообрабатывающий инструмент, компьютерная интеграция, автоматизированный процесс проектирования, интерактивное управление.

## ANNOTATION

Vorontsov B.S. **Computer-integrated system for providing the shaping of gears.** - Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.03.01 - machining processes, machines and tools. - National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The actual scientific and technical problem of quality assurance, first of all, the kinematic accuracy and smoothness of the operation of gear wheels and shortening the terms of technological preparation of their production by creating a computer-integrated system based on unified control parameters that provide the shaping of gears, which have a different shape of the tooth profile with the possibility of computer-aided design, active control and the visualization of the results is determined and scientifically justified and solved.

The basic concept in solving problems of forming is the ideal process - the model of the real process. In developing the ideal formation process, the main factors that affect the shape of the surface to be treated are taken into account. It is believed that the part, the tool and the equipment do not deform and do not wear out, the theoretically precisely fabricated and working elements of the technological system, precisely the adjustment of equipment is carried out, and the influence on the formation process of thermal phenomena is not taken into account.

A mathematical model for describing the machined surface of gear wheels, which is based on mathematical dependencies that allow interactively control the shape of the gear teeth by transforming the space together with the tooth surface dependent on it, and also by changing the internal parameters that determine the

profile of the tooth of the gear wheel is developed. The conditions for the development of a computer-integrated system for the shaping of gears, built on unified control parameters are created. The components that characterize the accuracy of gear wheels are analyzed. This is the kinematic accuracy, smoothness and contact area of the teeth. These components are influenced by various factors associated with all elements of the formation system

The mathematical model of the gear shaping system which is based on the generalized representation of the shaping function, which, in combination with the mathematical model of the machined surface of the gears, unifies the mathematical description and interactively obtains the original tool surface is developed.

The further development of the use of kinematic schemes for the formation of the 3rd class with respect to particular cases, in particular, the rolling with the sliding of the hyperboloid along the cylinder and the rolling with sliding of the hyperboloid along the generatrix of the straight line, for which the mathematical dependencies of the form function were obtained, which became the basis for the perfection of cutting tool of the «single-sheet hyperboloid» type.

The development of the theory of shaping allows us to expand the possibilities of the interaction of conjugate surfaces and consider new types of formation schemes, on the basis of which you can create tools with improved properties. Mathematical dependencies for complex analysis of geometric and kinematic parameters of interaction of conjugate surfaces are obtained. These mathematical dependencies are based on unified control parameters, which allowed us to analyze even at the design stage the conditions of interaction between the machined and tool surfaces that provide the production of gears and the conditions for contact of the coupled teeth. The use of unified parameters allows for the integration of a system of shaping, which includes a preliminary assessment of the geometry and kinematics of the process, in automated systems of design, production, analysis and control.

The computer-integrated system for providing the shaping of gears based on the proposed theoretical and methodological provisions has been developed. The results of the work are realized into production, in particular, using the developed computer-integrated system, hyperboloid tools for cutting gears with a unified profile of teeth are profiled and manufactured.

**Key words:** machining, gear wheels, shaping, gear machining tools, computer integration, automated design process, interactive control.